



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Kemian tekniikan koulutusohjelma

Paavo Mälkönen

PROSESSIUUNIEN TOIMINNAN SEURAAMINEN MALLINTAMALLA

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 4.4.2016.**

Valvoja

Professori Ville Alopaeus

Ohjaajat

Diplomi-insinööri Esa Tamminen

Diplomi-insinööri Simo Isosaari

Author Paavo Mälkönen		
Title of thesis Monitoring of process furnace by modeling		
Department Department of Biotechnology and Chemical Technology		
Professorship Chemical Engineering		
Thesis supervisor Ville Alopaeus		
Thesis advisors DI Esa Tamminen, DI Simo Isosaari		
Date 4.4.2016	Number of pages 77	Language Finnish

Abstract

In the oil refinery, process furnaces produce most of the energy needed. This master thesis describes the properties of flames found in process furnaces and ways to define quality of the flames based on the outside appearance. Additionally, modeling concept for effectively simulating process furnaces for operative use is created in this thesis.

Literature review will focus on chemistry and properties of the flames found in process furnaces as well as describing the burners most commonly used in process furnaces. Furthermore, most common problems related to outside appearance of the flames are characterized and best ways to correct the found issues are described.

In Applied part, model of process furnace is constructed using furnace of crude oil distillation unit in Neste Porvoo as an example case. With the modeling concept created in this thesis, the limitations of simulation program, that are present when modeling complex uneven splitting of the feed streams, are bypassed. Parameters used in the model are optimized by comparing simulation results to actual measured data from running furnace.

Optimized model is fairly accurate but greater change in total feed flow or output pressure of the furnace will generate significant difference to actual performance of furnace.

Keywords Process furnace, simulation, modeling, oil refining, FRNC-5PC

Tekijä Paavo Mälkönen		
Työn nimi Prosessiuunien toiminnan seuraaminen mallintamalla		
Laitos Biotekniikan ja kemian tekniikan laitos		
Professuuri Kemian laitetekniikka		
Työn valvoja Ville Alopaeus		
Työn ohjaajat DI Esa Tamminen, DI Simo Isosaari		
Päivämäärä 4.4.2016	Sivumäärä 77	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Prosessiuuneilla tuotetaan suurin osa öljynjalostuksen tarvitsemasta energiasta. Tässä diplomityössä käsitellään prosessiuuneissa palavien liekkien ominaisuuksia ja liekkien laadun määrittämistä liekin ulkonäön perusteella. Tämän lisäksi tässä diplomityössä laaditaan mallinnuskonsepti prosessiuunien seuranta varten.

Kirjallisuusselvityksessä esitellään polttokaasun palamisen kemia, palamisessa syntyvän liekin ominaisuudet, sekä yleisimmät prosessiuuneissa käytettävät polttimet. Tämän lisäksi käsitellään yleisimpiä ongelmia prosessiuuneilla, jotka voidaan havaita tarkastelemalla liekkien ulkonäköä.

Soveltavassa osassa laaditaan malli prosessiuunista käyttäen esimerkkitapauksena Nesteen Porvoon jalostamon raakaöljytislausyksikön prosessiuunia. Työssä laaditun mallinnuskonseptin avulla kierretään simulointiohjelman rajoitteet, joita esiintyy monimutkaisella prosessiuunilla syötön jakautuessa läpikäynneille epätasaisesti. Mallissa käytetyt parametrit viritetään vertaamalla simuloitua tulosta ja mitattuihin arvoihin.

Viritetty malli vastaa kohtuullisella tarkkuudella mitattuja arvoja, mutta kokonaissyöttövirtauksen tai prosessiuunin ulostulopaineen muuttuessa malliin syntyy merkittävää epätarkkuutta.

Avainsanat Prosessiuuni, simulointi, mallintaminen, öljynjalostus, FRNC-5PC
--

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Neste Oyj:n Porvoon jalostamon osaamiskeskuksessa 1.10.2015–31.3.2016 välisenä aikana. Haluan kiittää Nestettä mahdollisuudesta monipuolisen ja mielenkiintoisen diplomityön tekemiseen. Yhtiö tarjosi kaikin puolin erinomaiset puitteet työn tekemiselle.

Haluan esittää kiitokseni ohjaajilleni Esa Tammiselle, Simo Isosaarelle sekä Jarkko Reinolalle, joista oli korvaamaton apu työtä tehdessä. Erityisesti kiitän Esaa järjestelmällisestä ohjauksesta ja kiperistä kysymyksistä, jotka hikoiluttivat ja pakottivat itsenäiseen ajatteluun. Jarkolla oli myös todella paljon annettavaa nuoresta iästään huolimatta tai ehkä jopa sen ansiosta.

Suuret kiitokset myös professori Ville Alopeaukselle diplomityön valvomisesta ja tarkastamisesta sekä tarkoista visuaalisista havainnoista.

Erityismaininnan ansaitsevat työhuoneeni kolme muuta ahkeraa asukia. Jään kaipaamaan monisyisiä ja rönsyileviä keskusteluitamme. Heidän seurassaan oli miellyttävää työskennellä myös synkkinä talviaamuina. Kiitos kuuluu myös pikkuveljelleni, jota ilman tämä työ saattaisi yhä sisältää kielellisiä puutteita.

Porvoo 31.3.2016

Paavo Mälkönen

Sisällysluettelo

Lyhenteet ja termit

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimusongelma ja työn tavoitteet	1
1.2	Työn rakenne ja rajaus.....	2
	KIRJALLISUUSSELVITYS	3
2	Liekin kemia	3
2.1	Palamisen vaiheet	3
2.2	Tyypen oksidit.....	5
2.3	Noen muodostuminen.....	8
3	Liekin ominaisuudet.....	10
3.1	Liekin väri	10
3.2	Liekin lämpötila.....	13
3.3	Liekin muoto	17
3.4	Palamisnopeus.....	20
3.5	Ääni	22
4	Polttimet	24
4.1	Esisekoittava poltin	24
4.2	Diffuusiopoltin	26
4.3	Low-NOx- ja ultralow-NOx-polttimet	27
5	Yleisimmät ongelmat liekkien ulkonäössä.....	30
5.1	Liian pitkä liekki.....	30
5.2	Kaatuva liekki tai tuubeja nuoleva liekki	32
5.3	Epätasaiset ja epäsymmetriset liekit	33
5.4	Värähtelevä tai jaksottainen liekki.....	34
5.5	Liekin irtoaminen polttimesta	35
5.6	Liekin siirtyminen polttimen sisään	35
	SOVELTAVA OSA	37
6	Mallinnettava kohde ja työkalut.....	37
6.1	Prosessiuunit BA-10101/II A&B	37
6.2	Simulointiohjelma	40
7	Mallin laatiminen	43
7.1	Tavoiteltavat ominaisuudet	43

7.2	Säteilyosan mallinnusvaihtoehdot.....	44
7.3	Konvektio-osan mallinnusvaihtoehdot.....	46
7.4	Kokonaismalli	47
7.5	Mallinnusvaihtoehtojen vertailu	51
8	Prosessiuunimallin viritys	55
8.1	Säteilylämmönsiirron mallintaminen	60
8.2	Energiataseen viritys.....	61
8.3	Painetason viritys.....	63
8.4	Likaantumisvastuksen määrittäminen.....	66
9	Mallin toimivuuden tarkastelu	66
10	Johtopäätökset	72
	Lähdeluettelo	75

Lyhenteet ja termit

Alempi lämpöarvo	Polttoaineen palaessa muodostuva energia, kun syntyneen veden höyrystymisen sitoma energia huomioidaan.
CH_3^*	Mettyliradikaali
CH_2O^*	Formaldehydiradikaali
Diffuusioliekki	Polttokaasu ja polttoilma sekoittuvat vastapalotilassa
Ekvivalenttisuhte	Polttokaasun suhde polttoilmaan
OH^*	Hydroksidiradikaali
$H_2O_2^*$	Vetyperoksidiradikaali
M	Molekyyli, joka ei osallistu reaktioon mutta vastaanottaa osan vapautuneesta energiasta estäen käänteisen reaktion välittömän tapahtumisen.
NO _x	Yhteisnimi typpimonoksidille ja typpidioksidille
RT3	Porvoon jalostamon raakaöljyntislausyksikkö
Tuubi	Prosessiuunissa käytettävä putki, joka toimii lämmönsiirtimenä sisällä virtaavan lämmitettävän prosessiaineen ja uunin säteily- ja konvektio-osan välillä.
VBA	Visual Basic for applications -ohjelmointikieli

1 Johdanto

Öljynjalostus on energiasäästävä prosessiteollisuuden alue, jossa raakaöljystä jalostetaan pääasiassa tislamalla, krakkaamalla sekä reformoimalla polttoaineita ja petrokemian tuotteita. Nykyaikaiseen jalostustoimintaan kuuluu myös rikinpoisto olennaisena osana prosesseja.

Suurin osa näistä prosesseista vaatii korkeita lämpötiloja, jotka tuotetaan prosessiuuneissa polttamalla maakaasua tai jalostamon sivutuotteena syntyvää polttokaasua. Prosessiuunit kuluttavat suurimman osan jalostamolla käytettävästä energiasta. Uunien mahdollisimman tehokas toiminta onkin erittäin tärkeää koko jalostamon kannattavuuden kannalta.

1.1 Tutkimusongelma ja työn tavoitteet

Nesteen Porvoon jalostamolla on havaittu prosessiuunien toiminnan seuraamisessa parannettavaa. Tällä hetkellä seuranta tehdään pääosin mitattavien prosessiarvojen perusteella sekä silmämääräisesti tarkastelemalla liekkien kunto. Ongelmana on, että liekkien silmämääräiseen tarkasteluun puuttuu selkeä ohjeistus. Käyttöinsinööreiltä puuttuvat myös tehokkaat työkalut prosessiuunien pitkäjänteiseen seuraamiseen.

Tämän diplomityön tarkoituksena on pureutua syvemmin prosessiuunin liekkien ominaisuuksiin ja niiden laadun määrittämiseen ulkonäön perusteella. Tämän lisäksi on tarkoitus luoda mallinnuskonsepti, jonka avulla jalostamon prosessiuunit pystytään mallintamaan. Mallinnuskonseptin esimerkitapauksena käytetään jalostamon raakaöljyntislausyksikön RT3:n uuneja. Kyseisistä prosessiuuneista kehitetään malli, joka täsmätään prosessivirroista, poltto- ja savukaasuista otettuihin analyyseihin ja mittauksiin. Työn on tarkoitus vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä prosessiuunin toiminnasta voi päätellä liekkien ulkonäön perusteella?
- Miten prosessiuunimalli kannattaa laatia operatiiviseen käyttöön?

1.2 Työn rakenne ja rajaus

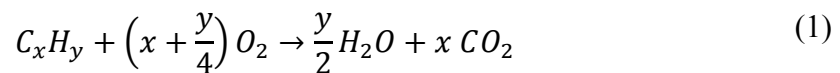
Tämä diplomityö on jaettu kirjallisuusosaan ja soveltavaan osaan. Kirjallisuusosassa keskitytään prosessiuunien liekkien ominaisuuksiin ja liekkien laadun määrittämiseen niiden ulkonäöstä. Käytettyjen polttoaineiden ja polttimien osalta käsittely rajataan Nesteen Porvoon jalostamolla tällä hetkellä käytössä oleviin polttoaine- ja poltintyyppeihin.

Soveltavassa osassa parannetaan RT3:n prosessiuuneista BA-10101/II A ja B tehtyä FRNC-5PC-uunisimulointiohjelmistolla toimivaa mallia. Mallin parametreja viritetään prosessiuunien mittauksista saatuja arvoja hyödyntämällä. Mallin toimivuus varmistetaan täsmäämällä malli prosessista saatavaan mittausdataan ja analyyseihin useampana eri tasepäivänä.

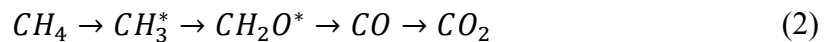
KIRJALLISUUSSELVITYS

2 Liekin kemia

Palamiseksi kutsutaan tilannetta, jossa aine reagoi hapen kanssa tuottaen runsaasti lämpöä. Palaessa syntyvää näkyvän valon aluetta kutsutaan liekiksi. Tässä työssä keskitytään prosessiteollisuudelle tyypillisimpien hiilivetyjen palamiseen ja niiden synnyttämään liekkiin. Yksinkertaistettuna hiilivetyjen palamisen kemiallinen reaktio on



Todellisuudessa palaminen on huomattavasti monimutkaisempi prosessi, jossa lopulliset tuotteet muodostuvat usean välivaiheen kautta. Esimerkiksi metaanin pääasiallinen hapettumisreitti korkeissa lämpötiloissa on



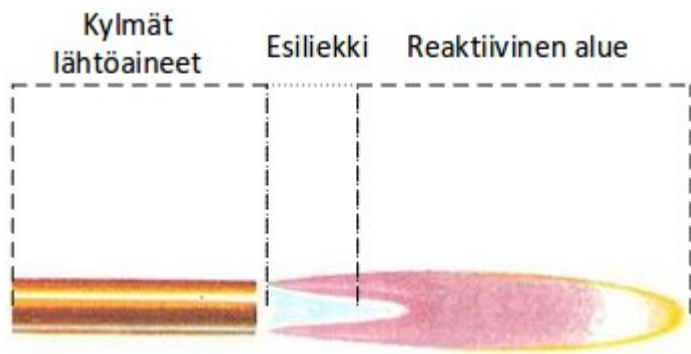
Välivaiheen tuotteista ainoastaan hiilimonoksidi on stabiili. Muut radikaaliyhdisteet reagoivat eteenpäin hyvin nopeasti. Monimutkaisuutta lisää entisestään CH_3^* -radikaalien keskinäinen reagoiminen etaaniksi (3), joka hapettuu eteenpäin eri reittiä pitkin kuin metaani. (W.C. Gardiner, 2000)



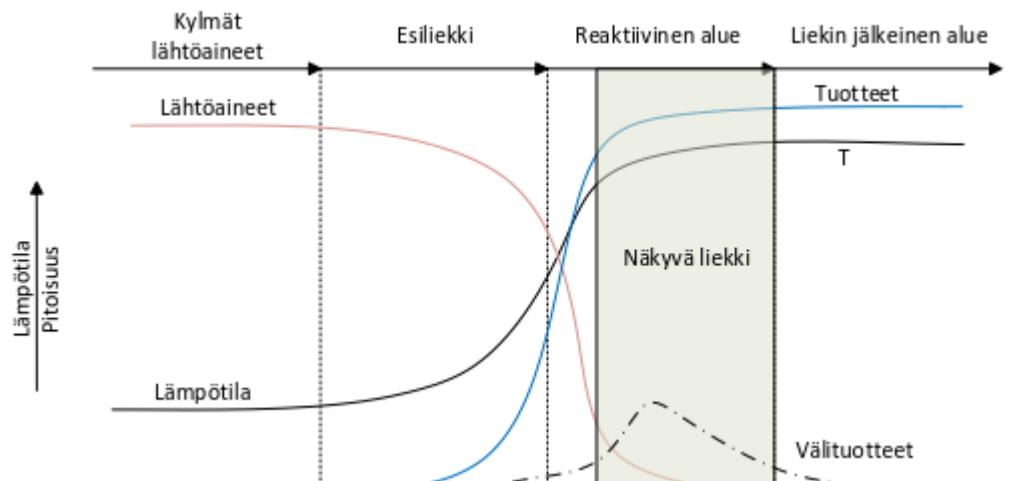
2.1 Palamisen vaiheet

Hiilivetyjen palaminen esisekoittuneella liekillä (engl. premix flame) happirikkaissa olosuhteissa voidaan jakaa kolmeen alueeseen (Kuvat 1 ja 2): esiliekkiin (engl. Preflame zone), reaktiiviseen alueeseen ja liekin jälkeiseen alueeseen (engl. Post-flame zone). (Griffiths, 1995) Esiliekin alueella pitkät hiilivetyketjut krakkautuvat

lyhemmiksi ja radikaalien konsentraatio kaasussa kasvaa. Reaktiiviselle alueelle siirryttäessä jäljellä on enää lyhyitä hiilivetyketjuja, vetyä ja radikaaliyhdisteitä. Reaktiivisella alueella hiilivedyt hapettuvat hiilimonoksidiksi ja radikaalien määrä ensin kasvaa rajusti ja sitten lähtee vähenemään. Kuvassa 2 esitetyt radikaali- ja tuotekonsentraatio eivät ole suoraan verrattavissa, sillä radikaaliyhdisteiden pitoisuus on todellisuudessa hyvin pieni verrattuna tuotekonsentraatioon. Reaktiivisella alueella lämpötila nousee riittävän korkeaksi virittämään reagoivien molekyylien elektrodeja. Näiden viritystilojen purkautuminen havaitaan liekin näkyvänä osana. (W.C. Gardiner, 2000)

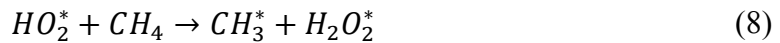


Kuva 1. Periaatteellinen kuva esisekoittuneesta adiabaattisesta liekistä. Mukailtu (Darling, 1999)

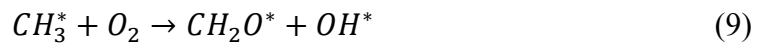


Kuva 2. Periaatteellinen kuva esisekoittuneen adiabaattisen liekin konsentraatio- ja lämpötilaprofiilista. Mukailtu (Griffiths, 1995)

Metaanin hapettumisessa tärkeimmät reaktiot radikaalien lisääntymiseen ovat



Sekä seuraavan vaiheen metanaali CH_2O^* radikaaleja muodostavat reaktiot:



Näkyvän liekin jälkeisellä alueella dominoivat hitaammat rekombinaatiot, joissa hiilimonoksidi ja vety hapettuvat sekä loput radikaalit kuluvat reaktioissa:



Täydellisessä palamisessa jäljelle jää vain hiilidioksidia ja vesihöyryä. (Griffiths, 1995)

2.2 Typen oksidit

Käytännössä palamisessa muodostuu aina myös typen oksideja. Typen oksidit eli NO_x-yhdisteet aiheuttavat ilmakehään päästyään happosateita, jonka vuoksi niille on määritelty päästörajat jalostamoiden ympäristölupiin, ja ovat siten palamisen ei-

toivottuja reaktiotuotteita. Typpioksideja muodostuu hiilivetyjä poltettaessa kolmella eri reittiä:

- Terminen-NOx (engl. Thermal NOx)
- Nopea-NOx (engl. Prompt NOx)
- Polttoaineen sisältämät typpiyhdisteet

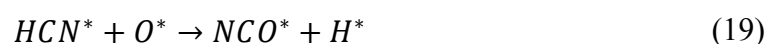
Termistä-NOx mekanismia kutsutaan myös Zeldovich-NOx-mekanismiksi sen kehittäjän Y. B. Zeldovichin mukaan (Zeldovich, 1946). Kuumimmissa liekin osissa osa polttoilman mukana tulleesta typestä hapettuu. Riittävän korkeissa lämpötiloissa O^* radikaalit reagoivat typpimolekyylien kanssa muodostaen typpimonoksidia:



Typpioksidien muodostumisnopeus kasvaa eksponentiaalisesti lämpötilan noustessa. Muodostuneiden typpioksidien määrään vaikuttaa myös suoraan verrannollisesti viipymäaika kuumassa liekin osassa sekä happi- ja typpikonsentraatiot liekissä. Tehokkain tapa vähentää typpioksidien muodostumista on liekin lämpötilan laskeminen. (Ahamad & Vallavanatt, 2013)

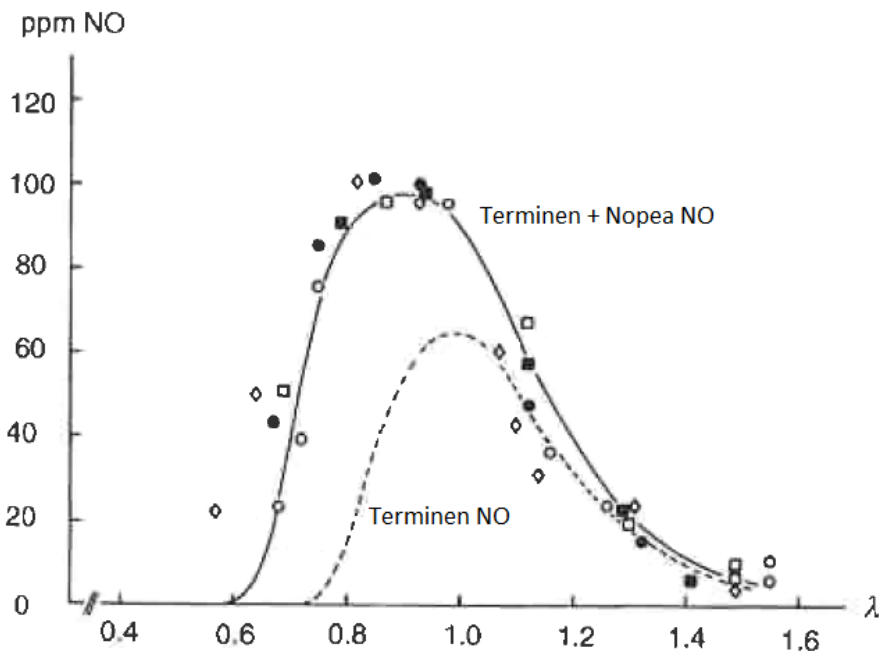
Nopea-NOx-mekanismin esitteli ensi kertaa C. P. Fenimore (1979), joka havaitsi mitatessaan typpimonoksidipitoisuuksia liekin viileässä alkupäässä, että NO-pitoisuus ei pienentynyt Zeldovichin mekanismin mukaan. Liekin lämpötilan ollessa alle 1400 °C typpioksideita ei enää muodostu merkittävästi reaktion (15) kautta (Warnatz, et al., 1999).

Tällöin merkittävän typpioksidilähteen muodostavat reaktioketjut:





Näiden reaktioiden tuottamilla typpimonoksideilla on merkitystä käytettäessä ultralow-NOx polttimia, joilla liekin lämpötila on huomattavasti tavallisen polttimen liekkiä matalampi. (Klaus & Warnatz, 1995) Polttimista kerrotaan lisää luvussa 4. Nopea-NOx-mekanismi on merkittävä myös polttokaasurikkaita seoksia käytettäessä. Kuvassa 3 on havainnollistettu Nopea-NOx-mekanismin merkitystä polttoainerikkaissa olosuhteissa. (W.C. Gardiner, 2000)



Kuva 3. Sekoitusreaktorissa muodostunut typpioksidi eri ilma-polttoakaasusuhteilla; $\lambda < 1$ tarkoittaa polttoainerikasta seosta. Mukailtu (Warnatz, et al., 1999)

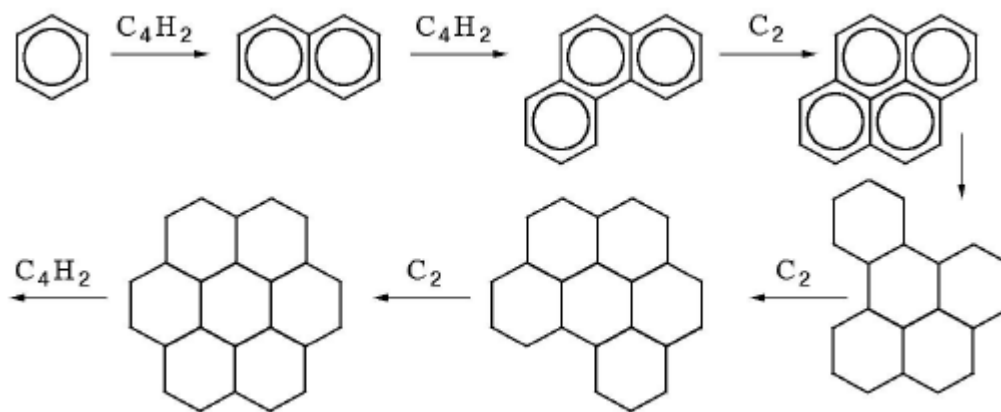
Kolmas reitti typen oksidien muodostumiseen on polttoaineen sisältämät typpiyhdisteet. Jopa 50 % polttoaineen sisältämästä tyypestä hapettuu typpioksideiksi. Tämän vuoksi käytettäessä typpipitoisia polttoaineita joudutaan usein käyttämään savukaasupesuria syntyneiden typpioksidien poistamiseen. Öljynjalostamon prosessiuuneilla käytetyissä polttoaineissa on hyvin vähän tyypeä

sisältäviä yhdisteitä, minkä vuoksi tämä reitti on harvoin merkittävä typpioksidilähde jalostamoilla. (Ahamad & Vallavanatt, 2013)

Teoriassa typpioksidien muodostuminen voidaan eliminoida täysin käyttämällä ilman sijasta puhdasta happea hapettimena sekä polttoainetta, joka ei sisällä typpiyhdisteitä. Puhtaan hapen käyttöä hapettimena kutsutaan happipoltoksi (engl. Oxy-fire). Happipolttota käytettäessä savukaasuja täytyy kierrättää huomattavasti, jottei liekin lämpötila nouse liian korkeaksi. Liian korkea liekin lämpötila, ja sitä myöten korkeampi säteilyteho aiheuttavat hiilivetyjen krakkaantumista ja koksautumista tuubeissa. Savukaasujen kierrätys johtaa siihen, että pienetkin ilmavuodot prosessiuunin sisälle lisäävät huomattavasti NO_x-päästöjä. Tämän vuoksi happipolttota käytettäessä on syytä käyttää ultralow-NO_x-polttimia, joita käsitellään tarkemmin luvussa 4. Monet kyseisistä polttimista soveltuvat sellaisenaan myös happipoltolle (Lowe, et al., 2013). Hapen käyttö myös lisää käyttö- ja pääomakustannuksia, koska hapen valmistusta varten täytyy jalostamon yhteyteen rakentaa oma yksikkö. Tällä hetkellä happipolton pääasiallinen käyttökohde jalostamoilla on tehostettu hiilidioksidin talteenotto, koska savukaasut sisältävät valmiiksi melkein pelkästään hiilidioksidia. (Koiwanit, et al., 2014)

2.3 Noen muodostuminen

Hiili/happisuhteen ollessa matala polttokaasun palamisessa korostuu kombinaatioreaktiot kuten (3). Tällöin muodostuu helposti pitkiä hiiliketjuja ja sitä myöten nokea (engl. Soot). Myöskään hiilimonoksidi ei enää hapetu hiilidioksidiksi. Ennen noen muodostumista, polttoainerikkaan seoksen palamisen seurauksena alkaa muodostua polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH) ja niistä edelleen nokea. Kuvassa 4 on esitetty PAH-yhdisteiden reagoiminen edelleen yhä suuremmiksi rengasrakenteisiksi hiilivetyketjuiksi, joista lopulta muodostuu nokipartikkeleita. Kuvassa esiintyvät C_4H_2 ja C_2 merkinnät kuvaavat liittyneiden atomien määrää ja tyyppiä tietyssä vaiheessa, eivät kemiallista yhdistettä. (Mansurov, 2005)



Kuva 4. Noen muodostumisreitti bentseeniyhdisteistä. (Mansurov, 2005)

Noen muodostuminen riippuu hiili-happisuhteen lisäksi lämpötilasta ja paineesta. Prosessiuunit ovat yleensä lähellä ilmanpainetta, minkä vuoksi paine harvoin on merkittävä tekijä noen muodostuksessa. Tietyllä lämpötila-alueella noen muodostuminen on suurinta. Esimerkiksi metaanille tämä alue on 1200 °C tienoilla. Mentäessä alle 1080–1130 °C noen muodostuminen loppuu kokonaan. Reaktiotuotteiksi muodostuu suuren moolipainon omaavia hiiliyhdisteitä, mutta viipymäaika kuumalla alueella ei ole riittävän pitkä noen muodostumiseen. Korkeissa yli 1750 °C lämpötiloissa nokea edeltävät PAH yhdisteet hajoavat ja nokea ei pääse syntymään. (Mansurov, 2005)

3 Liekin ominaisuudet

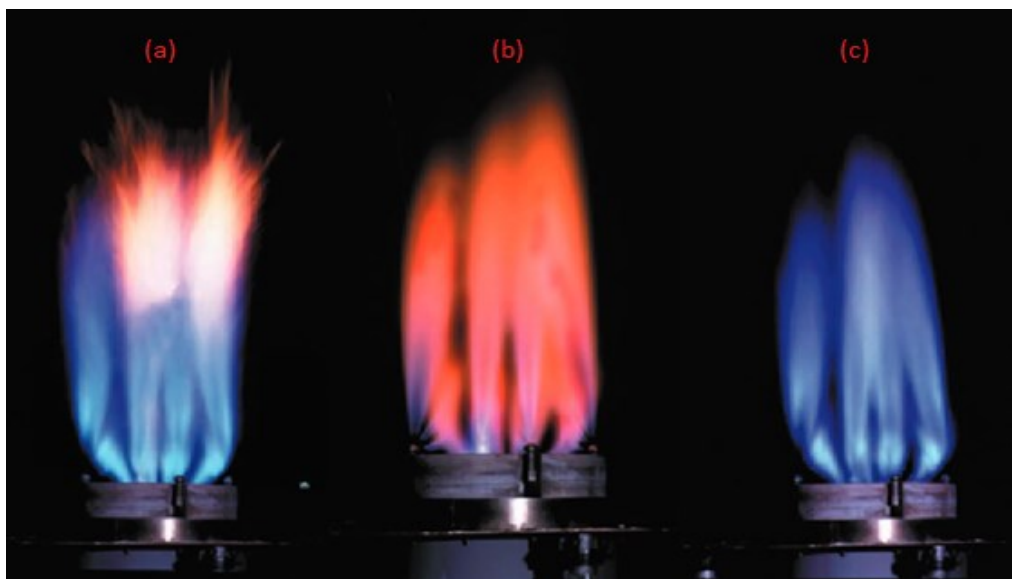
Tässä luvussa käsitellään niitä liekin ominaisuuksia, joilla on merkitystä liekin ulkonäköön.

3.1 Liekin väri

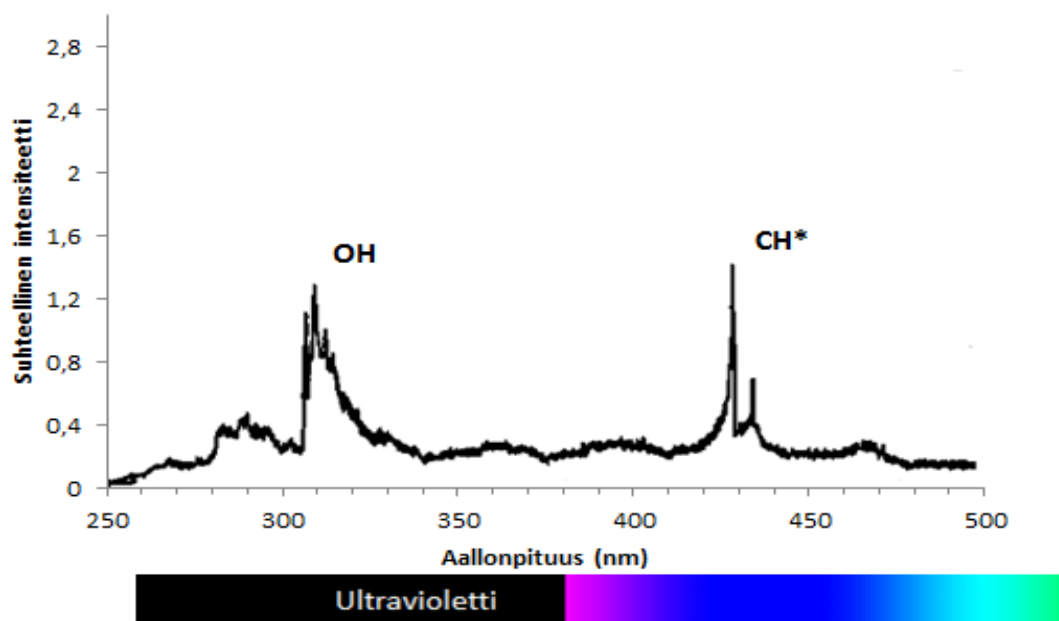
Liekin väri muodostuu reagoivien alkuaineiden ja yhdisteiden viritystilojen purkautumisesta sekä lämpötilan mukaisesta mustankappaleen säteilystä. (Griffiths, 1995) Prosessiteollisuudessa käytettävien polttoaineiden palamisesta syntyvän liekin väriin vaikuttavat:

- Polttoaine
- Ilma-polttoainesuhde
- Poltintyyppi

Jalostamoilla tavallisimmin käytetyt polttoaineet, kuten maakaasu ja keveitä hiilivetyjä sisältävä polttokaasu, palavat yleensä sinisellä tai keltaisella liekillä. Sininen liekki (Kuva 5c) johtuu polttoaineen asteittaisesta hapettumisesta ilman, että alkuainehiiltä syntyy palamisreaktioiden välituotteena. Tällöin väri muodostuu yksinomaan viritystilojen purkautumisen aiheuttamasta säteilystä. Nokea muodostamattoman liekin mustankappaleen säteilyn vaikutus väriin on pieni, sillä palokaasujen emissiviteetti (engl. Emissivity) on lähellä nollaa ultravioletin ja näkyvän valon alueilla. Kuvassa 6 esitetystä metaani-ilmaliekin emissiospektristä nähdään, että liekki säteilee voimakkaasti myös ihmiselle näkymättömällä ultravioletin alueella. Näkyvän valon aallonpituudella 431 nm kohdalla oleva piikki muodostuu pääasiassa CH^* radikaalin viritystilan purkautumisesta. (Cheng, et al., 1998)



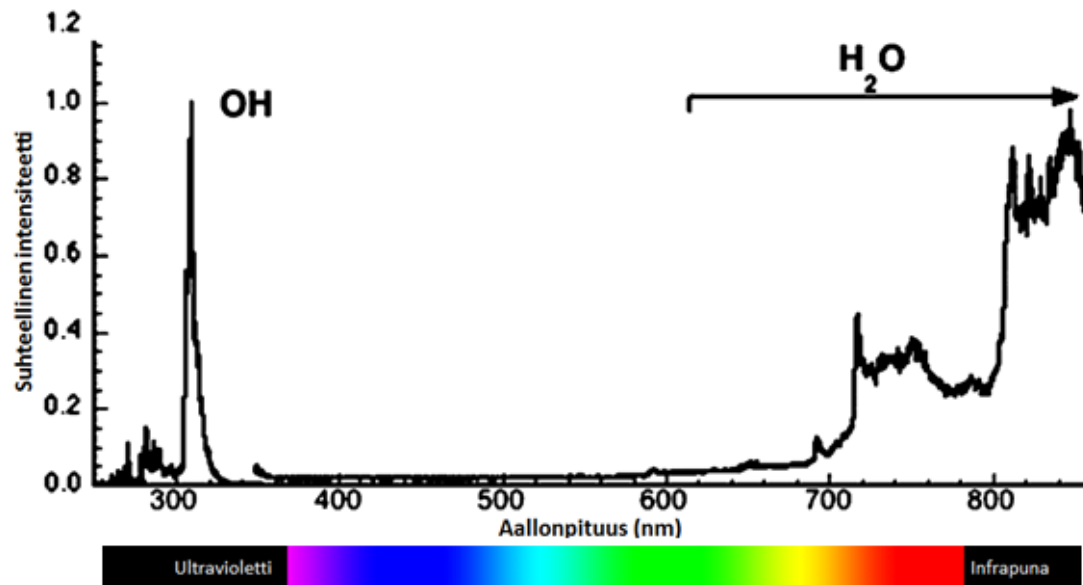
Kuva 5. Liekkien värit eri polttoaineilla: (a) Simuloitu FCC:n polttokaasuseos (b) Vety (c) Maakaasu. Muutettu (Baukal, 2013)



Kuva 6. Metaani-ilma liekin emissiospektri. Mukailtu (Cheng, et al., 1998)

Vastaavasti keltainen liekki (kuva 5a) syntyy, kun hiilivedyt ensin krakkautuvat alkuainevedyksi ja -hiileksi, jotka palavat erillään. Muodostuva alkuainehiili eli noki kasvattaa liekin säteilyn emissiviteettiä lähemmäs todellista mustankappaleen emissiviteettiä. Tällöin liekin lämpötila vaikuttaa merkittävästi liekin väriin saaden sen näyttämään keltaiselta. Muodostunut vety palaa vaalean punaisella liekillä (kuva

5b), jota on huomattavan vaikea nähdä paljain silmin muuten kuin mustaa taustaa vasten (Baukal, 2013). Tämän vuoksi monesti puhutaan osin virheellisesti, että vety palaa näkymättömällä liekillä. Kuvassa 7 havaitaan, että puhtaan vedyn palaessa liekin väri muodostuu pääasiassa vesimolekyylien viritystilojen purkautumisesta. (Schefer, et al., 2009)

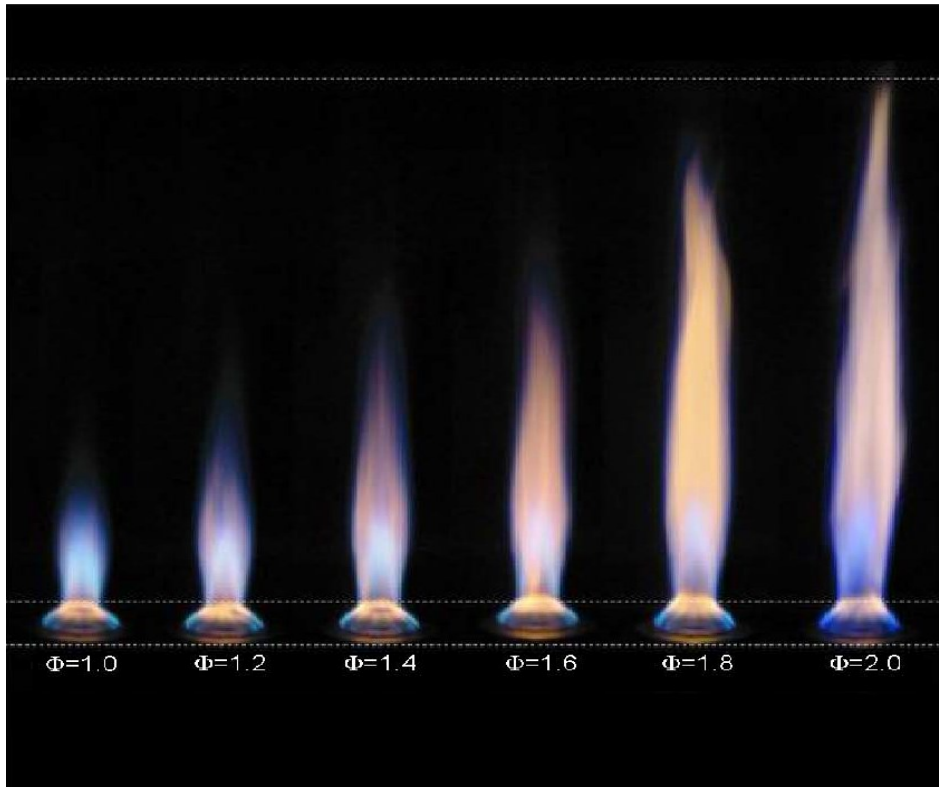


Kuva 7. Vety-ilma liekin emissiospektri. Mukailtu (Schefer, et al., 2009)

Keltaisen liekin esiintymisen todennäköisyys kasvaa, kun polttoaineen vetyhiilimassasuhte (H:C) pienenee. Puhdas metaani (H:C = 0,33) palaa tyypillisesti sinisellä liekillä, mutta propanin (H:C = 0,22) ja butaanin (H:C = 0,21) läsnä ollessa liekki on jo yleensä osittain keltainen (kuva 5a). Tämä johtuu siitä, että vetyhiilimassasuhteen suurentuessa noen muodostumisen todennäköisyys myös kasvaa. (Reed, 1981)

Ilma-polttoainesuhteen vaikutus liekin väriin perustuu noen muodostumisen lisääntymiseen ilman osuuden pienentyessä suhteessa polttokaasuun, jolloin polttoaine palaa epätäydellisesti. Noen muodostumisen syitä on avattu enemmän luvussa 2. Kuvassa 8 ilma-polttoainesuhteen vaikutusta on havainnollistettu lisäämällä polttokaasun syöttöä vasemmalta oikealle ja pitämällä ilmasyöttö vakiona.

Kuvasta havaittava liekin koon kasvaminen johtuu osittain kokonaisvirtauksen lisääntymisestä, mutta myös epätäydellinen palaminen pidentää liekkiä.



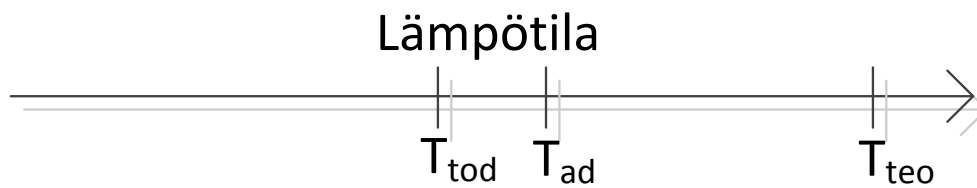
Kuva 8. Liekin väri eri ekvivalenttisuhteilla. (Sze, et al., 2006)

Poltintyyppillä on merkittävä vaikutus liekin väriin. Polttoilman vaiheistusta käytettäessä polttokaasu palaa kirkkaan keltaisella liekillä. Tätä on käsitelty enemmän luvussa 4.2.

3.2 Liekin lämpötila

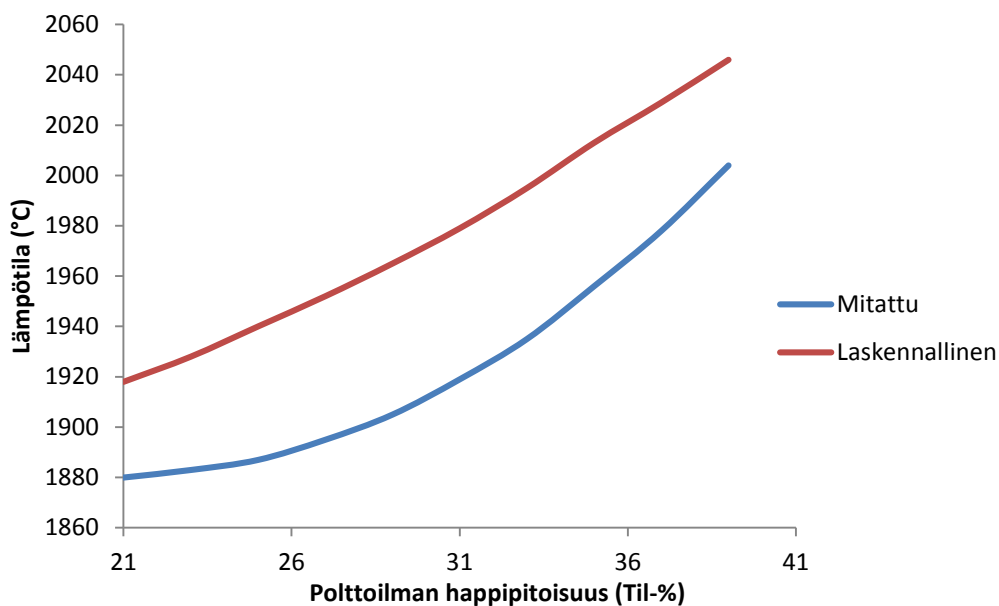
Liekin lämpötilaa kuvaamaan voidaan käyttää kolmea eri termiä, joiden suuruuseroja on havainnollistettu kuvassa 9. Termit ovat:

- Teoreettinen adiabaattinen maksimilämpötila (engl. theoretical maximum adiabatic temperature)
- Adiabaattinen lämpötila
- Todellinen lämpötila



Kuva 9. Periaatteellinen kuva todellisen lämpötilan, adiabaattisen lämpötilan ja teoreettisen maksimilämpötilan suuruuseroista.

Suurinta mahdollista tietyillä lähtöaineilla saavutettua liekin lämpötilaa kutsutaan teoreettiseksi adiabaattiseksi maksimilämpötilaksi. Kyseinen lämpötila tietylle polttoaineen ja hapettimen yhdistelmälle saavutetaan olettamalla, että lämmönsiirtoa systeemin ulkopuolelle ei tapahdu, palaminen tapahtuu stoikiometrisissä olosuhteissa ja kaikki lähtöaine reagoi tuotteiksi. Todellisuudessa liekin kuumimmissa kohdissa yhdisteet dissosioituvat laskien liekin lämpötilaa. Esimerkiksi hapen ja vedyn palaessa osa syntyvästä vedestä dissosioituu H^* ja OH^* radikaaleiksi. Useimmiten liekin lämpötilaa kuvataan kuitenkin adiabaattisella lämpötilalla. Tällöin dissosioituminen huomioidaan, mutta systeemin oletetaan yhä olevan eristetty. Todellinen liekin lämpötila on tätä matalampi, sillä osa lämmöstä siirtyy systeemin ulkopuolelle säteilemällä sekä konvektion vaikutuksesta laskien liekin lämpötilaa. (Spakovszky, 2007) Kuvassa 10 on havainnollistettu adiabaattisesti lasketun ja todellisen liekin lämpötilan eroa, kun kaasujen syöttölämpötila on 25 °C.



Kuva 10. Metaaniliekin mitattu ja adiabaattisesti laskettu lämpötila eri polttoilman happipitoisuuksilla. Mukailtu (Jones, et al., 1931)

Liekin säteilyintensiteetti kasvaa liekin lämpötilan kasvaessa. On arvioitu, että 70 % lämmöstä siirtyy lämmitettävään virtaan prosessiuunin säteilyosassa. (Bell & Lowy, 1967) Tästä syystä liekin lämpötilalla on olennainen vaikutus lämmönsiirtymisen tehokkuuteen.

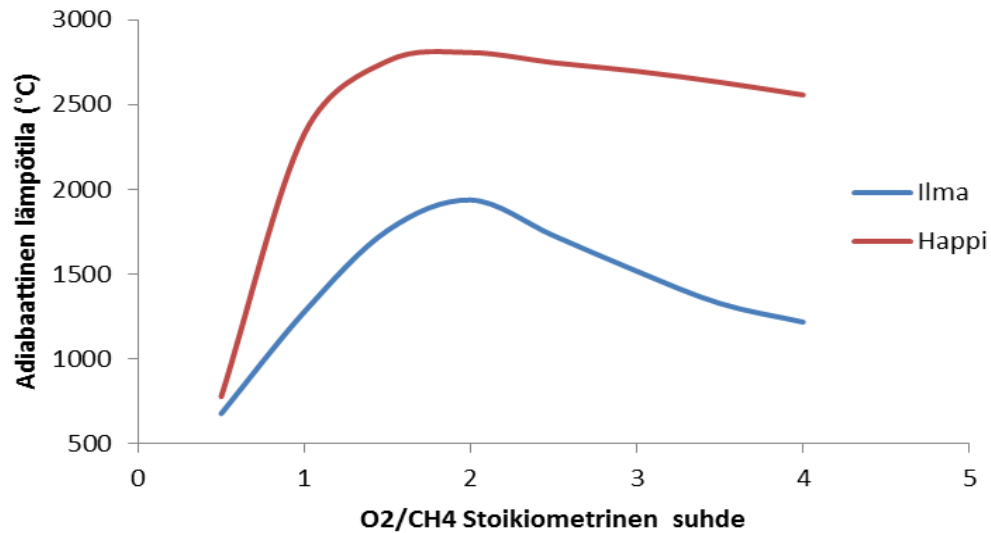
Liekin lämpötila riippuu:

- Polttoilman happipitoisuudesta
- Polttokaasun ja polttoilman suhteesta
- Polttoaineesta
- Polttoilman ja polttoaineen syöttölämpötilasta

Mitä enemmän polttoilmassa on happea, sitä kuumempi liekki on. Metaanin liekin adiabaattinen lämpötila ilmalla poltettaessa on 2000 °C:ta, mutta käytettäessä puhdasta happea liekin lämpötila on 2700 °C:ta. (Baukal, 2000)

Liekin lämpötila on kuumimmillaan, kun polttoaineen ja polttoilman suhde on stoikiometrinen, ja liekin lämpötila laskee siirryttäessä pois stoikiometriseltä alueelta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 11, jossa on esitelty metaaniliekin

lämpötila eri stoikiomerasuhteilla. Lämpötilan lasku on sitä voimakkaampaa, mitä pienempi on polttoilman happipitoisuus, koska polttoilman sisältämä typpi sitoo itseensä enemmän lämpöä sen konsentraation kasvaessa. (Baukal, 2000)



Kuva 11. Metaanin adiabaattinen liekin lämpötila eri stoikiomerasuhteilla. Mukailtu (Baukal, 2000)

Kuten taulukosta 1 voidaan havaita, käytetyllä polttoaineella on merkittävä vaikutus liekin lämpötilaan. Polttoaineen lämpöarvon perusteella ei voi suoraan tehdä johtopäätöksiä liekin lämpötilasta, sillä polttoaineesta riippuen syntyy eri määrä tuotteita, joiden sitoma lämpöenergia vaikuttaa liekin lämpötilaan. Joillain polttoaineilla välituotteet dissosioituvat voimakkaasti madaltaen liekin lämpötilaa. Dissosioitumisen vaikutus on merkityksellinen varsinkin käytettäessä puhdasta happea. Polttoaineseoksia käytettäessä polttoaineiden suhteilla on merkitystä liekin lämpötilaan. Esimerkiksi maakaasu-vetyseoksen liekin lämpötila kasvaa vetypitoisuuden kasvaessa. (Baukal, 2000)

Taulukko 1. Liekin adiabaattinen lämpötila eri polttoaineilla sekä hapettimilla. (Baukal, 2000)

Polttoaine	Adiabaattinen lämpötila (°C)		Alempi lämpöarvo (MJ/kg)	Alempi lämpöarvo (MJ/kmol)
	Ilma	Happi		
H ₂	2097	2806	121,00	244
CH ₄	1950	2780	50,01	802
C ₂ H ₄	2088	2902	56,32	1580
C ₂ H ₆	1986	2813	47,79	1437
C ₃ H ₈	1988	2822	46,35	2044
C ₄ H ₁₀	1973	2827	45,75	2659
CO	2108	2705	11,95	335

Polttoaineen palaminen tuo systeemiin energiaa, mikä näkyy tietyssä lämpötilaerona syötettyjen lähtöaineiden ja polttokaasun välillä. Ideaalitilanteessa lämpötilaero on vakio tietyllä palamisesta syntyneellä energiamäärällä. Tällöin syötettävän polttoaineen tai polttoilman lämpöä kasvattamalla voidaan liekin lämpötilaa kasvattaa vastaavalla energiamäärällä. Todellisuudessa dissosiatioreaktiot voimistuvat sitä enemmän mitä kuumempi liekin lämpötila on pienentäen näin ideaalista lämpötilan nousua. Jos liekin lämpötilaa halutaan nostaa syöttöaineita lämmittämällä, polttoilman esilämmitys on yleensä polttoilman esilämmitystä tehokkaampi tapa, koska polttoilman massavirta on suurempi kuin polttoaineen ja tuo siten enemmän energiaa prosessiin samalla lämpötilan nostamisella. (Baukal, 2000)

3.3 Liekin muoto

Monelle tutuin liekin lähde on tavallinen kynttilä. Sen pisaran muotoinen liekki johtuu gravitaation aiheuttamasta nosteesta, joka saa kuumat palokaasut virtaamaan ylöspäin. Prosessiuuneissa palavissa liekeissä muotoon vaikuttavat pääasiassa:

- Polttoaineen ja ilmasyötön määrä
- Poltintyyppi

Muita liekkiin vaikuttavia tekijöitä ovat:

- Liekkien keskinäiset interaktiot
- Prosessiuunin sisäiset savukaasuvirtaukset
- Mahdolliset ilmavuodot

Liekin muodolla on merkitystä lämmönsiirtymisen tasaisuuden kannalta. Esimerkiksi lattiaan asennettujen polttimien pitkillä liekeillä lämmönsiirtyminen uunin yläosissa on huomattavasti suurempaa kuin lyhyillä liekeillä. Todella pitkä liekki saattaa yltää konvektio-osaan ja aiheuttaa siellä vaurioita. Optimaaliseen liekin korkeuteen vaikuttavat uunin geometria ja tuubien sijainti. Standardin API 560 mukaan (ISO:13705:2012, 2012) liekin korkeus saa olla korkeintaan kaksi kolmasosaa säteilyosan korkeudesta. Hiilivetyjä kuumennettaessa tämä on erityisen tärkeää, sillä ylikuumentuessaan hiilivedyt koksautuvat luoden kuumia pisteitä tuubeihin, mikä saattaa johtaa lopulta putkirikkoihin. (Mullinger & Jenkins, 2008)

Polttoaineen ja polttoilman syöttömäärä vaikuttavat liekin pituuteen eritavoilla. Liekki pitenee, kun polttoainetta lisätään. Polttoaineen virtausnopeuden kasvaessa näkyvää valoa säteilevät yhdisteet ehtivät siirtyä kauemmas syttymispisteestä pidentäen liekkiä. Polttoilman syöttömäärän muuttaminen vaikuttaa käänteisesti liekin pituuteen. Kun polttoilmaa vähennetään, liekin pituus kasvaa, koska polttoaine alkaa palaa epätäydellisesti pidentäen reaktioaikoja. Polttoilmavirtauksen kasvattaminen taas parantaa polttoaineen ja polttoilman sekoittumista lyhentäen liekkiä. (Sze, et al., 2006) Tämä on havainnollistettu kuvassa 12, jossa polttoainevirtaus pidetään vakiona ja polttoilman määrää lisätään.



Kuva 12. Polttoilman virtausmäärän lisäyksen vaikutus liekin pituuteen. Ilmaa lisätään vasemmalta oikealle. (Sze, et al., 2006)

Polttimilla liekin muotoon voidaan vaikuttaa polttoaineen suuttimien suuntauksella, poltintiilillä ja liekinvakaimella (engl. Flame holder). Esimerkiksi pyöreän muotoisen liekin poltintiili on myös pyöreä ja polttoainesuuttimet on aseteltu symmetrisesti. Uuneilla, joissa liekki on suunnattu seinän tai lattian myötäisesti, tarvitaan litteää liekkiä. Tällöin poltintiili on suorakulmainen ja polttoainesuuttimet ovat tyypillisesti asennettu poltintiilen pituussuunnassa. Liekinvakain on varsinkin diffuusiopolttimilla tärkeä osa poltinta. Liekinvakain muodostaa pienen alueen, jossa polttokaasun ja ilman virtausnopeudet ovat hyvin alhaiset. Tällöin kova ilmavirtaus ei yhtä helposti saa liekkiä sammumaan ja liekki palaa vakaammin. (Baukal, 2014)

Seinälle suunnatun litteän liekin avulla saadaan tasaisempi lämpötilaprofiili uunille, sillä kiinteän seinän säteilyn emissiviteetti on huomattavasti parempi kuin puhtaan kaasun liekin tai savukaasujen emissiviteetti. Toisaalta tämän tyyppisellä prosessiuunilla, jossa polttimet on suunnattu seinille ja putket kulkevat keskellä, on suuremmat investointikustannukset, koska tuubipinta-ala suhteessa uunin kokonaistilavuuteen on matala. Uunityyppiä käytetäänkin pääasiassa, kun on erittäin

tärkeää saavuttaa tasaiset lämpötilaprofiilit niin tuubin pituussuuntaisesti kuin kehän suuntaisesti. (Baukal, 2014)

3.4 Palamisnopeus

Paikallaan olevan esisekoitetun kaasuseoksen läpi kulkevan liekkirintaman etenemisnopeutta kutsutaan palamisnopeudeksi (engl. Burning velocity). Vastaavasti liekkirintaman pysyessä paikallaan palamisnopeus on se nopeus, jolla kaasut kulkevat liekkirintaman läpi.

Palamisnopeus on merkittävä ominaisuus ainoastaan esisekoitetun kaasuseoksen palamisen yhteydessä. Diffuusioliekkien (engl. Diffusion flames) kuvaamiseen palamisnopeutta ei normaalisti käytetä. Tämä johtuu siitä, että diffuusioliekin palamisnopeus riippuu niin polttimesta kuin polttokaasun ja polttoilman virtausnopeudesta, eikä yhdellä polttimella mitattua palamisnopeutta voi hyödyntää toisella polttimella mitattuun palamisnopeuteen. (Griffiths, 1995)

Jos liekkirintaman oletetaan pysyvän paikallaan, tällöin kuvan 13 tasealueesta voidaan aineen häviöttömyyden perusteella muodostaa yhtälö:

$$\rho_u S_u = \rho_b S_b = J_m \quad (23)$$

jossa ρ_u palamattoman kaasun tiheys (kg/m³)

ρ_b palaneen kaasun tiheys (kg/m³)

S_u palamattoman kaasun nopeus (m/s)

S_b palaneen kaasun nopeus (m/s)

J_m massavuo (kg/m²s)

Liikemäärän säilyvyyden perusteella:

$$p_u + \rho_u S_u^2 = p_b + \rho_b S_b^2 \quad (24)$$

jossa p_u palamattoman kaasun paine (Pa)

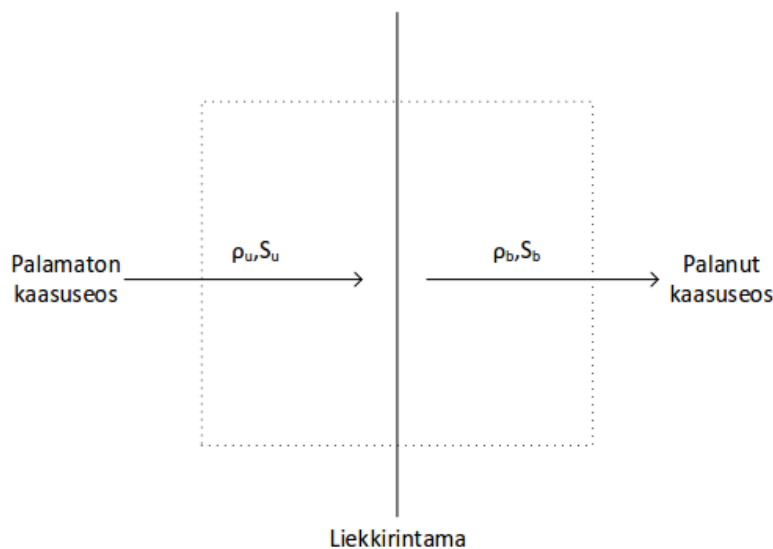
p_b palaneen kaasun paine (Pa)

Yhdistämällä yhtälöt (23) ja (24) ja järjestelemällä ne uudelleen saadaan:

$$J_m = \frac{p_b - p_u}{\rho_b - \rho_u} (\rho_u \rho_b) \quad (25)$$

$$J_m = \frac{p_b - p_u}{S_u - S_b} \quad (26)$$

Yhtälön (25) perusteella palaminen voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin. Nämä ovat detonaatio (engl. Detonation), jossa kaasun paine ja tiheys molemmat kasvavat liekkirintaman yli sekä palaminen (engl. Deflagration), jossa kaasun paine ja tiheys pienevät liekkirintaman yli. Yhtälön (26) perusteella kaasujen palamisesta aiheutuva paineen lasku saa palaneen kaasuvirran nopeuden kasvamaan. (Griffiths, 1995)



Kuva 13. Paikallaan pysyvän liekkirintaman ympärille muodostettu tasealue.

Palamisnopeudella on suuri vaikutus esisekoitetun liekin palamiseen prosessiuunissa. Palamisnopeuden ollessa liian pieni liekkirintama siirtyy kauemmas polttimesta, mikä saattaa johtaa liekin sammumiseen. Liian suuri palamisnopeus taas aiheuttaa liekin siirtymisen polttimen sisään vaurioittaen polttimen sisäosia, joita ei ole suunniteltu kestävänsä yhtä kovia lämpötiloja kuin polttimen uunin sisäpuoleisia osia. (Reed, 1981)

3.5 Ääni

Prosessiunit ovat kemianteollisuudessa huomattavia melun tuottajia. Suurin osa uunin tuottamasta äänestä syntyy polttimilla. Polttimilla syntyvät äänet voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin:

- Palamisääneen
- Kaasuvirtauksen synnyttämään ääneen
- Epävakaan palamisen synnyttämään ääneen

Palamisen synnyttämä energia nostaa kaasun lämpötilaa saaden sen paisumaan. Kaasun paisuminen synnyttää paineaallon, jonka korva rekisteröi äänenä. Kuten luvussa 2 todettiin, todellisuudessa palaminen tapahtuu useassa vaiheessa. Näistä jokainen synnyttää oman paineaaltonsa. (Turns, 2000) Tämän vuoksi palamisesta syntyvään ääneen vaikuttaa niin palamisnopeus kuin palavan seoksen tilavuus. Palamisreaktioiden satunnaisuus tuottaa laajan matalataajuisen äänispektrin tyypillisesti 200–500 Hz alueella. (Mullinger & Jenkins, 2008)

Polttimeen syötettävä ilma- tai polttokaasuvirtaus aiheuttaa huomattavaa melua, jos kaasuvirtauksen nopeus saavuttaa äänennopeuden. Jotta äänennopeus saavutettaisiin, täytyy polttoaineen syöttöpaineen nousta yli kriittisen painetasen, joka riippuu kaasun tiheydestä, mutta on tavallisesti 310 kPa suuruinen. Tällöin kaasuvirtaukseen muodostuu sokkiaaltoja, jotka puristavat ja laajentavat palokaasuja kulkiessaan virtauksen läpi aiheuttaen erittäin voimakasta ääntä. Tämä on suhteellisen helppoa välttää suunnittelemalla polttimet toimimaan pienemmillä kaasun syöttöpaineilla. (Mullinger & Jenkins, 2008)

Epävakaaksi palotapahtumaksi (engl. combustion instability) kutsutaan itseään ylläpitävää laajan amplitudin omaavaa, paineen vaihtelua. (McManus, et al., 1993) Turbulenttisen ilma-polttoaineseoksen epävakaata palaminen on tavallisesti kovaäänistä varsinkin lämmön vapautuessa suljetussa tilassa, kuten prosessiuunissa. Epävakaata palaminen on itseään vahvistava tapahtuma, jossa lämmön epätasainen vapautuminen aiheuttaa paineen heittelemistä, mikä johtaa polttimen

värähtelyyn ja siten vieläkin epätasaisempaan lämmönvapautumiseen. Prosessiuuneissa ongelma syntyy yleensä liian kovilla polttoaineen tai ilman syöttönopeuksilla. Paineen heiluessa liekki vuoroin irtoaa polttimesta ja vuoroin kiinnittyy polttimeen uudelleen aiheuttaen puuskittaista matalataajuisia ääntä. (Mullinger & Jenkins, 2008)

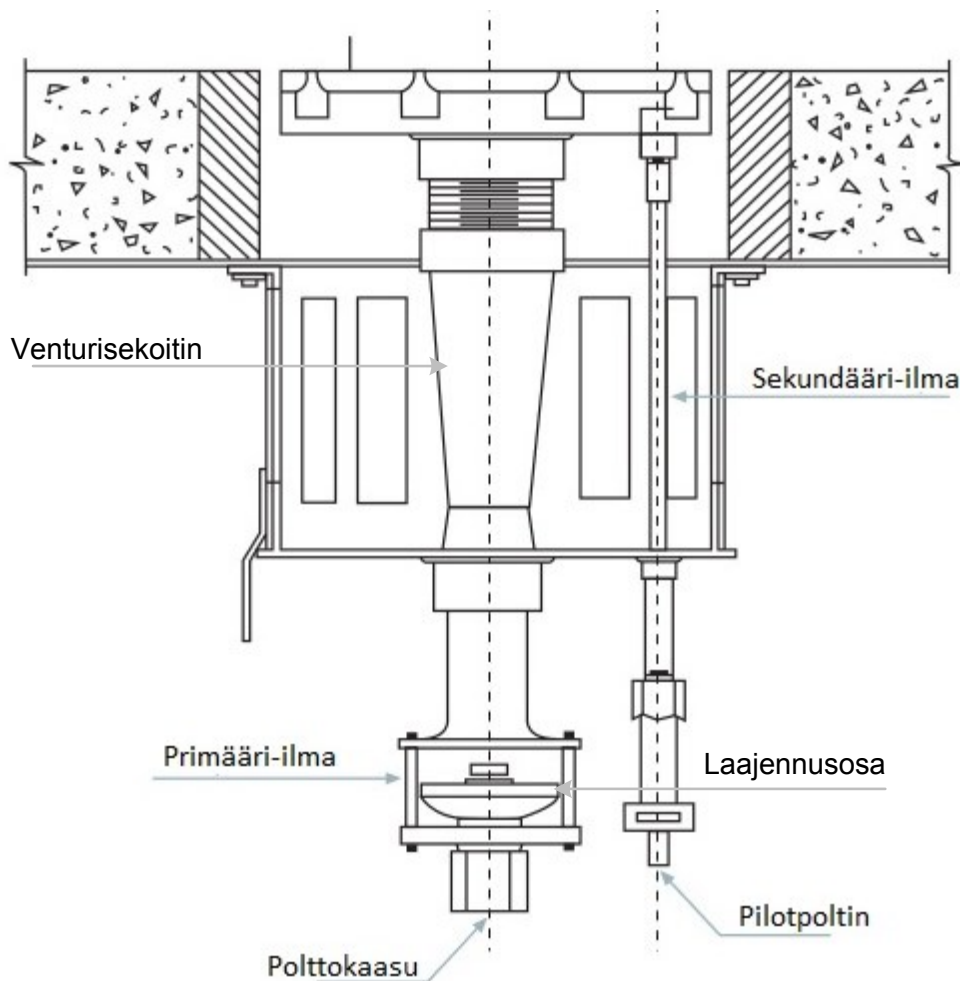
4 Polttimet

Jalostamon prosessiuunien liekit voidaan jakaa kahteen tyyppiin sen mukaan sekoittuuko polttoilma ja polttoaine polttimen sisällä vai vasta säteilyosassa. Prosessiuuneissa käytettävät polttimet jaotellaan pääasiassa käytetyn polttoaineen mukaan. Tässä luvussa keskitytään kaasua käyttäviin polttimiin, koska Porvoon jalostamolla ei muun tyyppisiä polttimia enää ole käytössä. Yleisimmät tavat jaotella kaasupolttimet ovat polttoilman ja polttoaineen sekoitustavan mukaan sekä NO_x-päästöjen mukaan. Muita mahdollisia jaotteluvaihtoehtoja ovat käytettävän hapettimen ja vedon mukaan jaottelemisen. (Baukal, 2000) Kriteerejä NO_x-päästöjen mukaan jaottelulle ei ole virallisesti määritelty, mutta yksi yleinen tapa jaotella Low-NO_x-polttimet on savukaasun sisäisen kierrätyksen ja syöttöaineiden vaihteistuksen mukaan. (Ahamad & Vallavanatt, 2013)

Polttoilman ja polttoaineen sekoitustavan mukaan polttimet voidaan jaotella kahteen päätyyppiin: esisekoittavat polttimet ja diffuusiopolttimet.

4.1 Esisekoittava poltin

Esisekoittavassa polttimessa (engl. Premix burner) polttoilma sekoitetaan polttokaasun kanssa polttimen sisällä olevassa sekoitusputkessa ennen sytytysaluetta. Kuvassa 14 on esitelty tyypillinen esisekoittavan polttimen rakenne. Korkeapaineinen polttokaasuvirta syötetään polttimen laajennusosaan, jossa se törmää paikallaan olevaan ilmapatsaaseen ja polttokaasun paine laskee. Tämä saa kaasuvirtauksen laajenemaan ja hidastumaan, jolloin liikemäärän säilyessä paikallaan oleva polttoilma lähtee liikkeelle ja sekoittuu polttokaasuun. Polttokaasun ja –ilman sekoittumista parannetaan edelleen laajennusosan jälkeisessä venturisekoittimessa. Hyvin suunniteltu poltin ottaa kaiken tai lähes kaiken tarvitsemansa polttoilman primääri-ilmasyötöstä. Tarvittavan ilmamäärän saannin varmistamiseksi esisekoittavissa polttimissa on myös sekundääri-ilmavirran syöttö. (Mullinger & Jenkins, 2008)



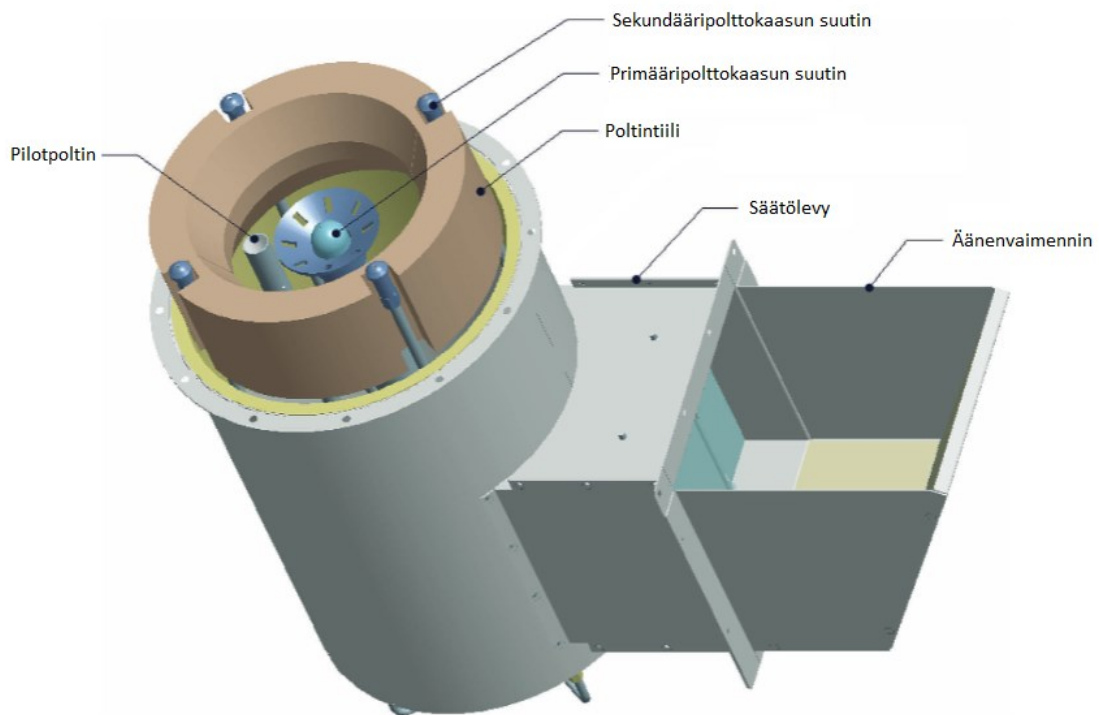
Kuva 14. Esisekoittavan polttimen rakenne. Mukailtu (Baukal, 2014)

Yksi esisekoittavan polttimen eduista on tehon säätäminen pelkästään polttokaasun syöttöä muuttamalla; polttokaasua vähennettäessä polttoilma vähenee samassa suhteessa. Tehon säätöä rajoittaa laajennusosan tehokkuus sekä polttokaasusuuttimen kapasiteetti. Toinen etu esisekoittavilla polttimilla on pienempi liekkiävuus verrattuna diffuusiopolttimiin. Tällöin on mahdollista rakentaa hyvin kompakteja prosessiuuneja ja siten säästää tilaa sekä investointikuluja. Esisekoittavien polttimien suurin ongelma on niiden riippuvuus tasalaatuisesta polttokaasusta. Polttokaasun laadun muutosta ei pystytä helposti kompensoimaan, koska polttokaasun ja polttoilman suhde riippuu polttokaasun molekyylipainosta ja polttimen mitoituksesta. Tällöin polttokaasuun sekoittuu joko

liikaa tai liian vähän ilmaa, jolloin prosessiuunin tehokkuus kärsii. Sekundääri-ilmalla pystytään vaikuttamaan polttoilman määrään kompensoiden laadun muutosta, mutta tämä lisää huomattavasti käsin tehtävää säätöä, mikäli polttokaasun laatu vaihtelee usein. (Baukal, 2000)

4.2 Diffuusiopoltin

Diffuusiopolttimessa polttoaine ja polttoilma sekoittuvat vasta säteilyosan alaosassa. Tällöin liekki-rintaman siirtyminen polttimen sisäosiin ei ole mahdollista. Poltin on siten esisekoitettavaa turvallisempi eikä se ole yhtä herkkä polttoaineen laadun vaihtelulle. Kuvassa 15 on esitelty yksi vaihtoehto diffuusiopolttimen rakenteelle. Diffuusiopolttimen säätäminen on esisekoitettavaa poltinta monimutkaisempaa, sillä ilman syöttöä pitää säätää myös polttokaasun määrän tai laadun muuttuessa. Diffuusiopolttimilla liekin koko on myös esisekoitettavaa poltinta suurempi, sillä sekoittumiseen vaadittava tila kasvattaa liekkiä. Riittävän sekoituksen ja kompaktin liekin muodon aikaansaamiseksi diffuusiopolttimissa joudutaan usein käyttämään useita polttoaineen syöttösuuttimia. Tällöin yksittäisen suuttimen halkaisija on oltava pieni, jotta virtausnopeus on riittävä tehokkaaseen palamiseen. Tämä heikentää polttimen käytettävyyttä, sillä pienellä halkaisijalla varustetut suuttimet tukkeutuvat helposti kaasun sisältämistä epäpuhtauksista tai putkistossa olevasta kuona-aineesta. Diffuusiopolttimet myös vaativat esisekoitettavia polttimia suuremman vedon riittävän sekoittumisen varmistamiseksi. Tämä saattaa muodostua ongelmaksi luonnonvetouuneilla. (Baukal, 2000)



Kuva 15. Polttokaasuvaiheistetun diffuusiopolttimen rakenne. Mukailtu (Baukal, 2013)

Diffuusiopolttimen tyypillä on mahdollista vaikuttaa myös liekin väriin. Joissain tapauksissa liekin värillä on merkitystä, sillä keltainen liekki säteilee sinistä liekkiä tehokkaammin tehostaen lämmönsiirtoa. Diffuusiopolttimella tämä tapahtuu syöttämällä polttokaasu ja polttoilma siten, että ennen tehokasta sekoittumista on laminaarisen virtauksen alue, jossa ilma ja polttokaasu sekoittuvat hitaasti eikä syttymistä tapahdu. Säteilyosan alaosan aiheuttaman lämpösäteilyn vaikutuksesta osa polttokaasun hiilivedyistä krakkautuu ja muodostaa nokea, joka palaa kirkkaan keltaisella liekillä varsinaisessa liekissä. (ESA Pyronics, 2000)

4.3 Low-NO_x- ja ultralow-NO_x-polttimet

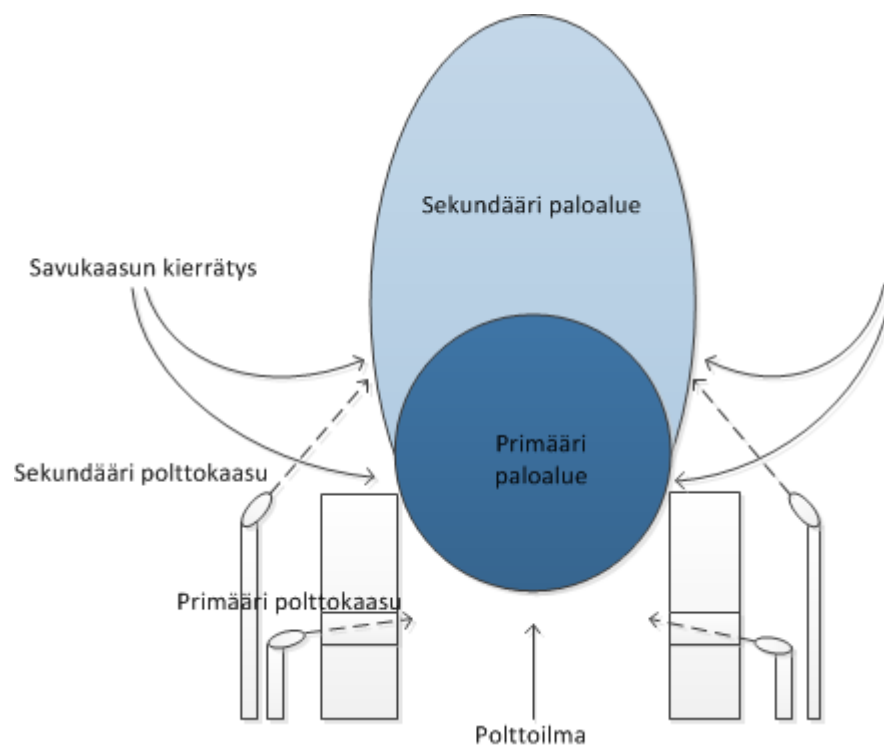
Prosessiuunien päästörajoitusten tiukentaminen on lisännyt painetta kehittää pienempiä päästöjä tuottavia polttimia, sillä päästöjen syntymisen vähentäminen poltintyyppiä muuttamalla on huomattavasti edullisempaa kuin niiden puhdistaminen savukaasuista erillisellä savukaasupesurilla. Kuten luvussa 2 esiteltiin,

korkea liekin lämpötila on merkittävin yksittäinen tekijä, joka lisää NOx- päästöjen muodostumista. Low-NOx- ja ultralow-NOx-polttimille onkin yhteistä, että päästöjä pienennetään liekin lämpötilaan vaikuttamalla. (Ahamad & Vallavanatt, 2013)

Low-NOx-polttimilla liekin lämpötilaa pienennetään vaiheistamalla polttokaasun tai polttoilman syöttöä. Tällöin polttoaine palaa ensin polttoainerikkaalla ja sitten happirikkaalla alueella. Tällä tavoin liekki ei missään vaiheessa pala stoikiometrisella alueella, jolla sen lämpötila on kuumimmillaan. Vaiheistettujen polttimien liekki on pidempi kuin vaiheistamattomien polttimien, mikä on syytä huomioida, jos poltintyyppiä muutetaan olemassa olevassa prosessiuunissa. (Ahamad & Vallavanatt, 2013)

Ultralow-NOx-polttimella polttokaasun tai polttoilman vaiheistuksen lisäksi prosessiuunin sisäistä savukaasua kierrätetään takasin polttimen liekkiin. Tätä on havainnollistettu kuvassa 16, jossa on esitelty polttoaineen vaiheistukseen perustuvan ultralow-NOx-polttimen toimintaperiaate. Savukaasukierrätyksen avulla palavaa kaasuseosta laimennetaan, jolloin liekin lämpötila laskee entisestään. Näin saavutetaan hyvin matalat NOx-päästöt. (Baukal, 2014)

Ultralow-NOx-polttimien asentaminen vanhoihin uuneihin tavanomaisten polttimien tilalle ei ole yksinkertaista. Savukaasun sisäisen kierrätyksen toteuttaminen vaatii huomattavasti enemmän prosessiuunin geometrialta kuin käytettäessä tavanomaisia polttimia ilman savukaasun kierrätystä. Savukaasun virtaus prosessiuunissa pitää suunnitella siten, että liekit pysyvät pystyssä ja irti tuubeista. Polttimet pitää myös sijoittaa riittävän etäälle toisistaan, jotta eri poltinten liekit eivät yhdisty kasvattaen liekkien pituutta. Polttimien määrää on myös usein tarvetta kasvattaa, koska käytettäessä useampaa polttinta saadaan lyhemmät liekit ja vältetään tarve erittäin korkealle prosessiuunille. (Ahamad & Vallavanatt, 2013)



Kuva 16. Polttokaasun vaiheistavan ultralow-NO_x-polttimen toimintaperiaate.

5 Yleisimmät ongelmat liekkien ulkonäössä

Liekin muodon silmämääräinen arviointi on tärkeää aina prosessiolosuhteiden muuttuessa, sillä väärän muotoiset liekit saattavat aiheuttaa ongelmia niin käytettävyyteen, taloudellisuuteen kuin turvallisuuteenkin. Tavallisimpia ongelmia liekin muodossa ovat:

- Liian pitkä liekki
- Kaatuva liekki tai tuubeja nuoleva liekki
- Epätasainen ja epäsymmetrinen liekki
- Värähtelevä tai jaksottainen liekki
- Liekin irtoaminen polttimesta
- Liekin siirtyminen polttimen sisään
- Liekkien yhdistyminen

Tässä luvussa esitellään nämä ongelmat, niiden vaikutukset prosessiin, ongelmien syyt ja korjaustoimenpiteet.

5.1 Liian pitkä liekki

Liian pitkät liekit voidaan havaita suoraan liekkien ulkonäön perusteella mutta myös epäsuorasti mittausten perusteella. Liekit ovat tavallista pidempiä, prosessiuunin säteilyosan pohjalle asennetuista polttimista liekit saattavat yltää konvektio-osaan asti. Polttokaasu palaa keltaisella mahdollisesti savuttavalla liekillä. Polttokaasun kulutus on kasvanut ilman, että prosessin ulostulolämpötilaa on kasvatettu. Osa tuubeista on kuumempia kuin aikaisemmin ja hiilimonoksidimittauksissa saatetaan havaita kohonneita pitoisuuksia. (Baukal, 2014)

Todennäköisin syy pitkiin liekkeihin on liian pieni polttoilman määrä suhteessa polttokaasun määrään, jolloin palaminen ei ole täydellistä. Epätäydellinen palaminen on tehottomampaa ja lisää siten polttokaasun kulutusta. Epätäydellisestä palamisesta syntyy myös nokea, joka kiinnittyy konvektio-osan tuubien pinnoille

heikentäen lämmönsiirtymistä, jolloin konvektio-osassa ei välttämättä päästä tavoiteltuun tehoon. Tämä huonontaa entisestään prosessiuunin tehokkuutta. (Lieberman, 2009)

Mahdollisia syitä väärään polttokaasun ja polttoilman suhteeseen ovat:

- Tukkeutuneet ja vahingoittuneet polttokaasusuuttimet
- Vajaa polttoilmasyöttö
- Operointi polttimen suunnittelualueen ulkopuolella tai normaalia pienemmällä poltinmäärällä
- Vääränlainen polttimien sijoittelu tai tulipesän geometria

Polttokaasusuuttimet saattavat olla osittain tai kokonaan tukkeutuneet johtuen polttokaasuvirrassa olevista nestemäisistä epäpuhtauksista, jotka koksautuvat suuttimen kärkeen. Suuttimet saattavat olla myös liian suuret johtuen toistuvista suuttimille tehdyistä puhdistusoperaatioista tai vääränlaisista puhdistukseen käytetyistä työkaluista. Huollon yhteydessä on saatettu myös asentaa vääränlaiset suuttimet polttimiin. Korjaavina toimenpiteinä kannattaa ensin tarkistaa, ovatko suuttimet tukkeutuneet ja mitata auki olevien suuttimien reiän koko. Kaikki vahingoittuneet ja vääränlaiset suuttimet tulee vaihtaa uusiin. (Baukal, 2014)

Vajaa polttoilmasyöttö voidaan havaita prosessiuunin savukaasukanavaan asennetulla mittalaitteella vähentyneenä ylimäärähappena. Myös veto on syytä tarkistaa ja lisätä polttoilmasyöttöä tarvittaessa. (Lieberman, 2009)

Jos aiemmin kuvatuista toimenpiteistä huolimatta liekit ovat yhä liian pitkiä, saattaa haluttu lämpöteho olla yli polttimien suunnittelualueen. Tämä on mahdollista myös normaalikuormalla, jos osa polttimista on pois käytöstä. Käytössä olevat polttimet eivät saa riittävästi ilmaa, koska ilmasyötön kapasiteetti ei riitä. Tällöin pitää mahdollisuuksien mukaan ottaa käyttöön sammutettuja polttimia tai vähentää polttokaasun syöttöä. (Baukal, 2014)

On myös mahdollista, että prosessiuunin geometria tai polttimien sijoittelu on suunniteltu alun perin väärin. Tämä on todennäköisempää ultralow-NO_x-polttimilla,

jotka kärsivät herkästi vääränlaisesta savukaasun kierrätyksestä. Geometriasta johtuvien ongelmien korjaaminen on uunin rakentamisen jälkeen haastavaa ja vaatii lähes aina uunin pidempiaikaisen sammuttamisen. Joissain tapauksissa pelkästään polttimien suuttimien suuntauksilla ongelma korjaantuu. (Baukal, 2014)

5.2 Kaatuva liekki tai tuubeja nuoleva liekki

Liekin ulkonäköä tarkastettaessa saatetaan huomata, että liekki ei ole suorassa. Liekki saattaa myös koskettaa tuubeja. Vaikka kallellaan olevan liekin näkyvä osa ei osuisi tuubeihin asti, saattaa osa liekistä säteillä ultravioletin tai infrapunan alueella, mitä ei havaitse paljaalla silmällä. (Baukal, 2014)

Liekkien osuminen tuubeihin on erittäin vaarallista, sillä tuubeja nuoleva liekki aiheuttaa tuubiin kuuman pisteen, jossa prosessivirta koksautuu voimakkaasti. Vaikka tilanne korjattaisiin liekin osalta, tuubin sisäpuolelle koksautunut kerros heikentää lämmön siirtymistä prosessivirtaan, jolloin tuubi yhä kuumenee likaa. Tämä voi pahimmillaan johtaa tuubin rikkoutumiseen ja palavan prosessiaineen vuotamiseen prosessiuunin sisään aiheuttaen tulipalon. Jos ongelmaa ei saada nopealla aikataululla korjattua, pitää kyseinen poltin ottaa pois käytöstä. (Baukal, 2014)

Mahdollisia syitä kaatuvalle liekille ovat:

- Tukkeutuneet polttokaasusuuttimet
- Vääränlainen polttimien sijoittelu tai tulipesän geometria
- Ongelmat polttoilman syötössä
- Poltinten ja tulipesän huoltoon liittyvät ongelmat

Näistä tukkeutuneet polttokaasusuuttimet ja vääränlainen polttimien sijoittelu tai tulipesän geometria on käsitelty aikaisemmassa luvussa 5.1.

Polttoilman epätasainen jakautuminen polttimelle saa liekin kaatumaan happiköyhälle puolelle. Tämä voi johtua osittain tukkeutuneesta ilmanottoaukosta.

Esimerkiksi prosessiuunin katosta on saattanut pudota rappauksia polttimen päälle tukkien osittain ilman kulun. Kovat tuulet saattavat myös aiheuttaa liekkien kallistumista. Tämä on huomattavasti todennäköisempää luonnonvetouuneilla kuin pakkovetouuneilla. Jos liekkien kallistumissuunta vaihtuu tuulen suunnan ja nopeuden mukaan, uunin ympärille on syytä rakentaa seinä vähentämään tuulen vaikutuksia uunilla. (Baukal, 2014)

Halkeilleet ja muuten vahingoittuneet poltintiilet saattavat aiheuttaa liekin suunnan muutoksen. Myös ilmavuodot tulipesään saattavat saada liekin nojaamaan kohti vuotokohtia. (Baukal, 2014)

5.3 Epätasaiset ja epäsymmetriset liekit

Erot liekkien ulkonäössä prosessiuunin poltinten välillä indikoivat ongelmista polttimilla. Osa liekeistä voi olla eripituisia tai -muotoisia. Yksittäinen liekki saattaa olla keltainen muiden ollessa sinisiä. Varsinaisesta liekistä saattaa erottua pienempiä liekkejä, joiden suunta eroaa varsinaisesta liekistä. (Baukal, 2014)

Liekkien epäsymmetrinen muoto aiheuttaa lämpötilaeroja tulipesän sisällä, jolloin kaikki tuubit eivät lämpene tasaisesti. Pahimmillaan tämä voi johtaa liikaa kuumenevien tuubien koksautumiseen ja kuumien pisteiden syntyyn. Osa polttokaasusta saattaa myös palaa epätäydellisesti heikentäen prosessiuunin kokonaistehokkuutta. (Baukal, 2014)

Yleisimmät syyt epäsymmetriseen palamiseen ovat:

- Polttoilman epätasainen jakautuminen
- Polttokaasusuuttimien vääränlainen asennus
- Tukkeutuneet polttokaasusuuttimet

Ilmasyöttö ei välttämättä jakaudu tasaisesti polttimille. Tämä saattaa johtua puutteellisesta suunnittelusta. Ilmasyötön tasapainottamiseksi pitää ensin tarkistaa, että kaikki ilmarekisterit ovat täysin auki. Ilmarekistereillä tarkoitetaan polttimen

primääri- tai sekundääri-ilmaa rajoittavia käsin säädettäviä säätöpeltejä. Tämän jälkeen suljetaan säätöpeltejä eritavalla palavan polttimen ympäriltä. Tämän toimenpide saattaa osoittautua erittäin hankalaksi toteuttaa uuneilla, joissa on suuri määrä polttimia, sillä yksittäisen ilmarekisterin muuttaminen vaikuttaa kaikkien polttimien ilmasyöttöön. (Lieberman, 2009)

Yksittäisen liekin muoto saattaa erota muista prosessiuunin liekeistä, jos polttimen suuttimet eivät ole oikein suunnattu. Tämä on todennäköistä, jos osa varsinaisesta liekistä erkanelee eri suuntaan kuin pääosa liekistä. Tällöin polttimen suuttimet on suunnattava uudelleen toimittajan ohjeiden mukaisesti, jotta varmistetaan yhdenmukainen liekkien muoto. (Baukal, 2014)

Tukkeutuneista polttimista puhutaan enemmän luvussa 5.1.

5.4 Värähtelevä tai jaksottainen liekki

Jaksoittaisen liekin voi havaita paitsi ulkonäöstä myös palamisen tuottamasta matalataajuisesta äänestä, joka eroaa huomattavasti tavallisesta palamisäänestä. Ääni syntyy epätasaisesta palamisesta, joka aiheuttaa liekin koon vaihtelua ja hetkittäisiä paineen vaihteluja. (Mullinger & Jenkins, 2008)

Jaksottainen liekki johtuu merkittävästä happivajeesta palotapahtumassa. Ylimäärä happianalysaattoriin ei voi aina luottaa, sillä ilmavuodot aiheuttavat todellisuutta korkeampia happilukemia. Jaksottaisella liekillä palaminen tapahtuu pulsseina niissä kohdissa tulipesää, jossa happea on saatavilla. (Holloway, et al., 2012)

Ensimmäinen toimenpide on vähentää polttokaasun syöttöä. Jos ensin lisätään ilmaa, lisääntynyt virtaus saattaa sammuttaa liekin kokonaan. Polttokaasua vähennetään 10-15 %, ja seurataan vaikutusta. Mikäli liekki yhä on jaksottaista, vähennetään polttokaasua edelleen kunnes liekki tasaantuu. Tämän jälkeen lisätään vuoroin ilmaa ja polttokaasusyöttöä, jotta päästään taikasin tarvittaviin lämmitystehoihin. (Holloway, et al., 2012)

5.5 Liekin irtoaminen polttimesta

Liekin irtoamisella (engl. Flame lift-off) tarkoitetaan tilannetta, jossa polttimen ja näkyvän liekin väliin jää tyhjä tila. Polttimien ja tarkastusluukkujen sijainnista riippuen liekin irtoamista saattaa olla vaikea havaita, jos näköyhteys polttimien kärkeen on huono. Jos osa liekeistä sammuu ja niitä on hankala saada syttymään, saattaa yhtenä syynä olla liekkien irtoaminen. (Baukal, 2014)

Mahdolliset syyt liekin irtoamiselle ovat:

- Ilman ja polttokaasun syöttönopeus on yli polttimen kapasiteetin
- Polttokaasusuuttimien vääränlainen asennus
- Liekinvakain puuttuu tai on vahingoittunut

Jos ilman ja polttokaasun syöttönopeus on huomattavasti liekin palamisnopeutta suurempi, liekki irtoaa polttimesta. Tällöin polttimen primääri-ilman syöttöä pitää pienentää. Diffuusiopolttimella liekin irtoaminen perustuu ilman ja polttokaasun hitaaseen sekoittumiseen. Ensimmäinen toimenpide liekin kiinnittämiseksi takaisin polttimeen on polttokaasun paineen pienentäminen. (Muñiz & Mungal, 1997)

Liekin irtoaminen saattaa johtua myös vääränlaisesta polttokaasusuuttimien asennuksesta. Suuttimet voivat olla suunnattu väärin tai ne ovat asennettu väärälle korkeudelle. Suuttimien oikea asennus pitää tarkistaa poltinvalmistajan piirustuksista ja spesifikaatioista. (Baukal, 2014)

Diffuusiopolttimella on myös mahdollista, että liekinvakaaja on vioittunut, jolloin liekki ei stabiloidu polttimen juureen. Tämä johtaa liekin irtoamiseen ja aiheuttaa herkästi liekin sammumisen. (Muñiz & Mungal, 1997)

5.6 Liekin siirtyminen polttimen sisään

Esisekoittavilla polttimilla on mahdollista, että liekin palamisnopeus on suurempi kuin polttoaine-ilmaseoksen syöttönopeus, jolloin liekkirintama siirtyy polttimen sisälle (engl. Flashback). Liekin siirtyminen polttimen sisäosiin pystytään yleensä

havaitsemaan, jos polttimeen sisään on suora näköyhteys kuten seinään asennettujen polttimien tapauksessa. Polttokaasun palaminen polttimen sisällä saattaa myös näkyä polttimen uunin ulkopuolisen osan oranssina hehkumisena. (Kurdyumov, et al., 2000)

Liekin siirtyminen polttimen sisälle aiheuttaa polttimen sekoittimelle tai venturille vahinkoa johtuen suunniteltuja kuumemmista lämpötiloista. Polttoaineen palaminen polttimen sisällä heikentää myös polttimen tehoa. Jos ongelma koskee useampaa poltinta, prosessiuuni lämmitysteho ei välttämättä riitä tarvittavaan prosessiaineen lämpötilan nostoon. (Kurdyumov, et al., 2000)

Ongelman korjaamiseksi poltin pitää aluksi ottaa pois käytöstä ja antaa jäähtyä. Helpoin korjaustoimenpide on polttokaasusyötön kasvattaminen. Jos tällä toimenpiteellä ei saada ongelmaa korjattua, voidaan pyrkiä vaikuttamaan ilman määrään polttokaasu-ilmaseoksessa. Kuten luvussa 3.4 kerrottiin, palavassa seoksessa ilman määrällä on merkitystä palamisnopeuteen. Ilma määrää voidaan vähentää ja siten hidastaa palamisnopeutta sulkemalla primääri-ilmanottoaukkoa. Jotta vältetään liian pienellä ilmamäärällä palaminen, pitää vastaavasti sekundääri-ilman syöttöä lisätä. (Baukal, 2014)

SOVELTAVA OSA

6 Mallinnettava kohde ja työkalut

Tässä luvussa esitellään mallinnettavat prosessiuunit BA-10101 A/II ja B/II sekä käytetty simulointiohjelma FRNC-5PC.

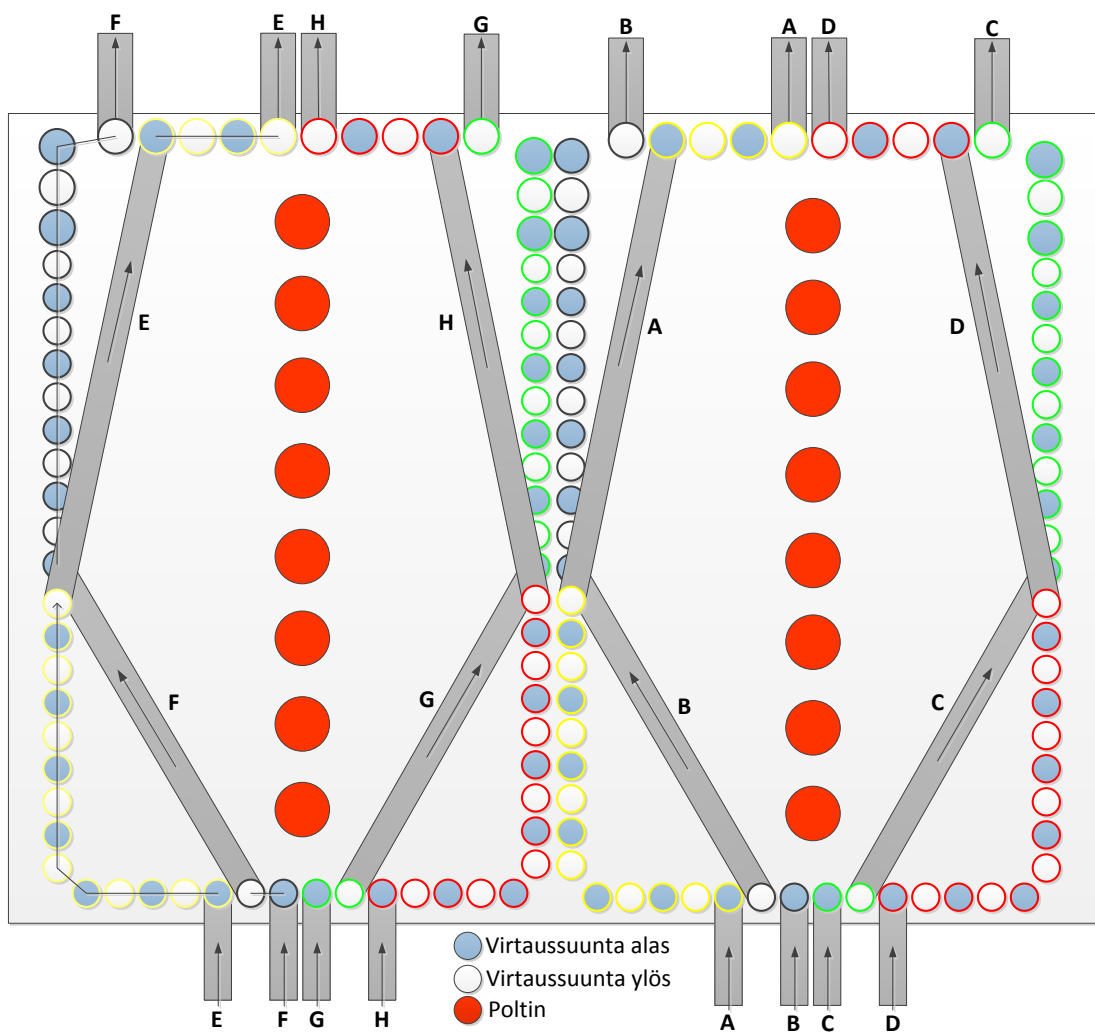
6.1 Prosessiuunit BA-10101/II A&B

Raakaöljyn tislausyksikön (RT3) prosessiuuneja BA-10101 A/II ja B/II käytetään esitislaturun raakaöljyn osittaiseen höyrystämiseen. Prosessiuunit ovat identtiset kaksilohkoiset laatikkouunit. Uuneille esitislauksesta tuleva virtaus jaetaan läpikäynteihin tasaussäätöventtiilien FCA101110A-H (A-uuni) ja FCA101210A-H (B-uuni) avulla siten, että läpikäyntien ulostulolämpötilat ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Virrat yhdistyvät uunien jälkeen ennen tislauskolonnia DA-10101. Yksittäinen uuni muodostuu seuraavista osista:

- Säteiliosa
- Konvektio-osa
- Polttoilman esiesilämmitin
- Polttoilman esilämmitin

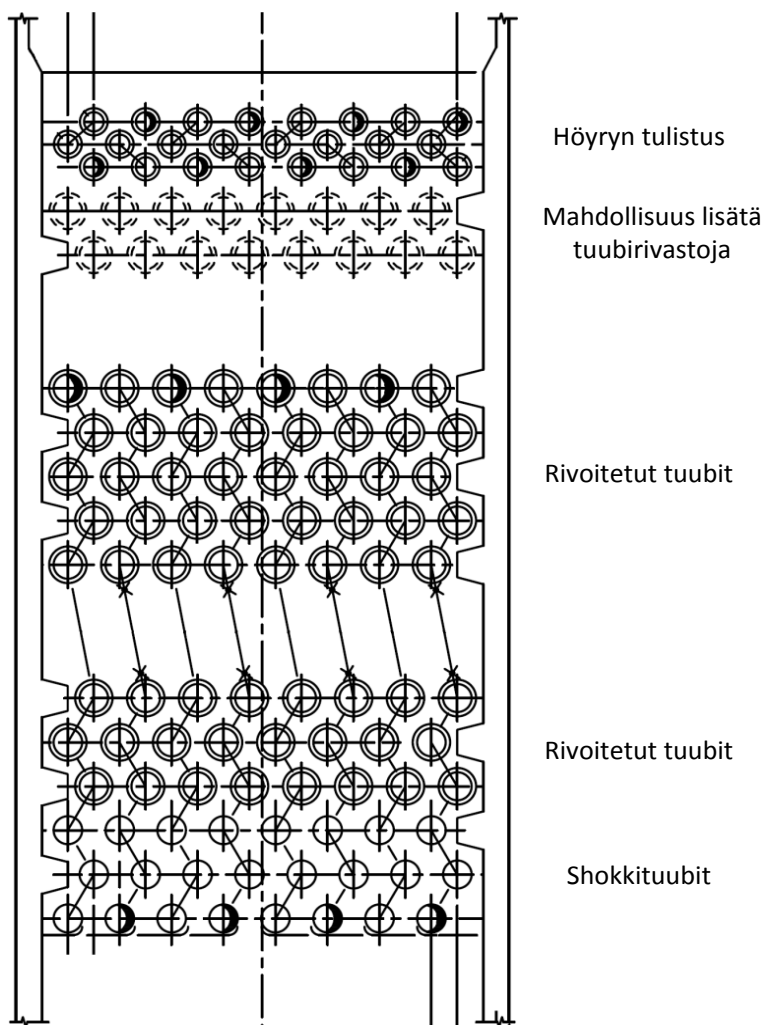
Yhden prosessiuunin säteiliosa koostuu kahdesta identtisestä lohkoista, joissa molemmissa on neljä läpikäyntiä. Kuvassa 17 on esitelty läpikäyntien jakautuminen uunilohkossa. Jokaisessa läpikäynnissä on 22 kapeampaa pystytuubia, yksi samankokoinen vaakatuubi katossa ja neljä halkaisijaltaan suurempaa pystytuubia. Tuubin halkaisija on suurempi säteiliosan loppupuolella, jotta virtausnopeus ei kasvaisi liian suureksi osan prosessiaineen höyrystyttyä. Molemmissa lohkoissa on kahdeksan säteiliosan pohjalle asennettua poltinta. Vaikka läpikäyntien tuubimäärät ovat identtiset, läpikäyntien vastaanottama säteily eroaa suurimmillaan 20 %. Säteilyn tehokkuuteen suurin vaikuttava tekijä on siinä, että B, C, F ja G

läpikäynneissä tuubeista suurempi osa on uunin pitkällä sivulla kuin muissa läpikäynneissä, joissa tuubeja on enemmän uunin lyhyellä sivulla. Pitkällä sivulla polttimien liekit ovat lähempänä tuubeja ja yksittäinen tuubi näkee useamman liekin kuin lyhyellä sivulla. Toinen säteilyn tehokkuuteen vaikuttava tekijä on läpikäyntien A, B, G ja H sijainti säteilyosan keskellä, jolloin ne vastaanottavat osittaista säteilyä molempien lohkojen polttimista. Säteilyosan läpikäyntien erot aiheuttavat merkittävää vaihtelua läpikäyntikohtaisissa virtausmäärissä. Tämä johtuu ulostulolämpötilan tasaussäädöstä, joka pitää ulostulolämpötilat vakiona.



Kuva 17. Periaatekuva ylhäältäpäin A uunin säteilyosan lohkon kahdeksasta läpiviennistä, jotka ovat merkittynä kirjaimilla A, B, C, D, E, F, G ja H.

Konvektio-osa jakautuu kolmeen osaan (kuva 18), joista ylintä käytetään höyryn tulistamiseen ja kahdella muulla kuumennetaan prosessiainetta. Konvektio-osan alin tuubiryhmä koostuu shokkituubeista (engl. Shock-tubes). Shokkituubit näkevät säteilyosan liekit, jolloin lämmön siirtyminen tapahtuu savukaasuvirrasta konvektiolla ja palamisprosessista säteilemällä. Kyseinen tuubiryhmä ei ole rivoitettu, koska sen lämpövuoto on huomattavasti muuta konvektio-osaa suurempi, mikä saattaisi vahingoittaa tuubien ripoja. Shokkituubit suojaavat ylempiä rivoitettuja tuubeja säteilyosan säteilyltä. Ripojen avulla ylempien tuubien lämmönsiirtopinta-alaa saadaan lisättyä huomattavasti parantaen lämmön talteenottoa savukaasuvirrasta.



Kuva 18. Konvektio-osan tuubit, joissa prosessiaine virtaa ylhäältä alaspäin. (Neste Oyj, 2015)

Konvektio-osaan tuleva esitislattu raakaöljysyöttö jakautuu kahdeksaan rinnakkaiseen läpikäyntiin. Raakaöljy virtaa vastavirtaan suhteessa säteilyosasta tuleviin savukaasuihin. Tällä estetään savukaasun ja raakaöljyn lämpötilaeron kasvaminen liian suureksi.

Konvektio-osasta savukaasut siirtyvät polttoilman esilämmittimeen, jolla osa savukaasun hukkalämmöstä otetaan talteen polttoilmaan ja parannetaan näin uunin hyötysuhdetta. Polttoilmaa lämmitetään ensin glykolilämmönvaihtimessa ja vasta jälkeen varsinaisessa savukaasuja hyödyntävässä esilämmittimessä. Glykolilämmönvaihtimen avulla lämpötilasäädin pitää polttoilman lämpötilan vakiona. Tästä johtuen lämmönvaihdin voidaan rajata tässä työssä tarkasteltavan taseen ulkopuolelle.

6.2 Simulointiohjelma

Työssä käytetty simulointiohjelma FRNC5-PC on suunniteltu kemian- ja energiateollisuuden prosessiuunien mallintamiseen. Ohjelma mallintaa lämmönsiirtymistä ja painehäviöitä käytännössä testattujen laskentamenetelmien avulla. Lähtötietoina ohjelma tarvitsee syöttöaineen ja polttokaasun tilan ja aineominaisuudet sekä prosessiuunin geometrian. Tämän lisäksi simulointiohjelmalla pystyy määrittelemään monipuolisesti eri uuniosien materiaaleja, jolloin esimerkiksi lämpöhäviöiden mallintaminen tarkentuu.

Simulointiohjelma mallintaa prosessiuunin energiataseen täsmäämällä sen kolmella yhtälöllä:

- Prosessipuolen energiatase
- Polttoaineen palamisen energiatase
- Energian siirtyminen savukaasupuolelta prosessipuolelle

Simulointiohjelma muodostaa prosessipuolen energiataseen sisään menevän ja ulostulevan prosessiaineen lämpötilan ja paineen perusteella. Ohjelmassa on

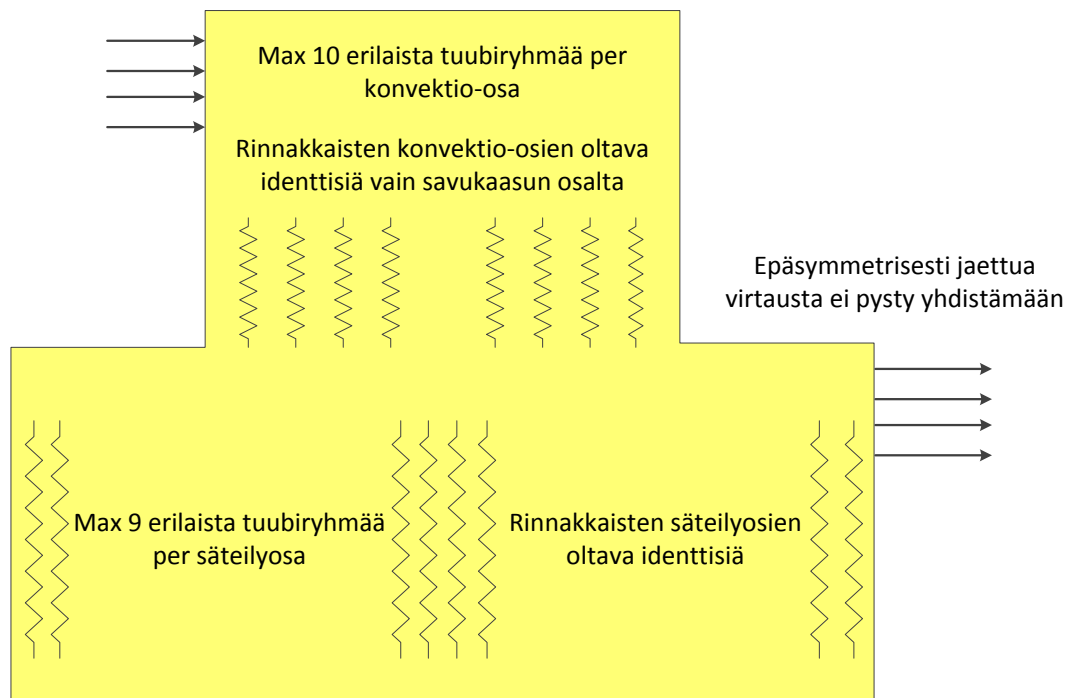
mahdollista kiinnittää yksi prosessipuolen virroista, jolloin ohjelma laskee tarvittavan polttotehon.

Savukaasupuolen energiatase lasketaan palamisesta syntyneen lämpöenergian sekä sisään tulevien polttokaasu- ja polttoilmavirtojen entalpioiden muutoksesta. Jos prosessiuunin polttoteho kiinnitetään, simulointiohjelma laskee prosessivirran tehon.

Säteilyosassa simulointiohjelma olettaa energian siirtymisen savukaasupuolelta prosessiaineeseen tapahtuvan pelkästään säteilemällä. Shokkituubien osalta ohjelma huomioi sekä konvektion että säteilyn. Muille konvektio-osan tuubeille ohjelma huomioi vain konvektiolla tapahtuvan lämmönsiirron. Malli huomioi oletuksena myös lämpöhäviöt ulkoilmaan. Tarvittaessa ohjelmalla pystytään mallintamaan myös ulkoilman lämpötilan vaikutusta lämpöhäviöihin.

Simulointiohjelmassa on tiettyjä rajoitteita, jotka vaikeuttavat epäsymmetrisesti toteutetun prosessiuunin mallintamista. Kuvassa 19 on havainnollistettu merkittävimpiä näistä puutteista. Mallinnus tapahtuu tuubiryhmiä (engl. Coil sections) hyödyntämällä. Tuubiryhmillä mallinnetaan tuubien ominaisuudet ja sijainti prosessiuunin sisällä. Valitettavasti säteilyosassa sijaitsevien tuubiryhmien määrä on rajattu yhdeksään. Rinnakkaisten säteilyosien määrää ei ole rajattu, mutta toisistaan poikkeavien säteilyosien polttoteho täytyy kiinnittää uunikohtaisesti. Tällöin mallia ei pysty käyttämään polttokaasun kulutuksen ennustamiseen. Vastaavasti konvektio-osan tuubiryhmien lukumäärä on rajattu kymmeneen. Rinnakkaisten konvektio-osien hyödyntäminen on helpompaa kuin säteilyosan kohdalla, sillä rinnakkaisilla konvektio-osilla ainoastaan savukaasun jakautuminen tulee olla identtistä. Simulointiohjelma jakaa uunille syötetyn prosessivirran tasaisesti läpikäynteihin. Jos prosessivirtoja halutaan muuttaa läpikäyntikohtaisesti, täytyy mallissa virrat erottaa ennen prosessiuunia. Tällöin virtoja ei myöskään pysty yhdistämään simulointiohjelman avulla prosessiuunin jälkeen.

Jaettaessa virtaus
epäsymmetrisesti läpikäynnit
täytyy mallintaa yksitellen



Kuva 19. Periaatekuva simulointiohjelman rajoitteista.

7 Mallin laatiminen

Tässä luvussa käsitellään mallin muodostamista ja siihen liittyviä kriteereitä. Aluksi käydään läpi niitä ominaisuuksia, joita mallilla halutaan kuvata. Tämän jälkeen esitellään vaihtoehtoisia mallinnustapoja ja vertaillaan, kuinka hyvin ne täyttävät mallilta toivotut kriteerit.

7.1 Tavoiteltavat ominaisuudet

Käytännössä mallinnusvaihtoehtojen vertailu tapahtuu kahdella pääkriteerillä: käytettävyydellä ja mallin tarkkuudella. Mallin tarkkuus voidaan jakaa useampaan pienempään osa-alueeseen. Vertaamalla mallin tuloksia prosessiuuneista saatavilla olevaan mittausdataan pystytään tekemään päätelmiä mallin tarkkuudesta.

Jotta mallia voitaisiin hyödyntää käytännössä, mallista pitäisi tehdä yksinkertainen käyttää ja mallin virittämiseen ei saisi kulua liikaa aikaa. Simulointiohjelman rajoitteiden vuoksi useammasta pienemmästä osamallista rakennettu kokonaisuus lisää mallin täsmäämiseen ja käyttöön kuluva aikaa.

Mallin tarkkuuteen vaikuttavia ominaisuuksia, joita halutaan tarkastella:

- Tuubien likaantuminen
- Virtausmäärät ja syöttöpaineet eri läpikäynneissä
- Tuubien pintalämpötilat
- Prosessipuolen virtojen ulostulolämpötilat

Tuubien koksautumista ja likaantumista on haastavaa mitata käynnissä olevasta prosessista. Tämä vuoksi likaantumisen mallintaminen on tärkeää. Tuubien likaantuminen on myös prosessiaineen ominaisuuksien vaihtelun lisäksi todennäköisin syy, joka johtaa mallin tarkkuuden heikkenemiseen ajan kuluessa.

Suunnitteluvaiheessa mallinnettaessa oletetaan, että virtaus jakautuu tasaisesti kaikkiin läpikäynteihin. Mittausdatan perusteella mallinnettavien prosessiuunien

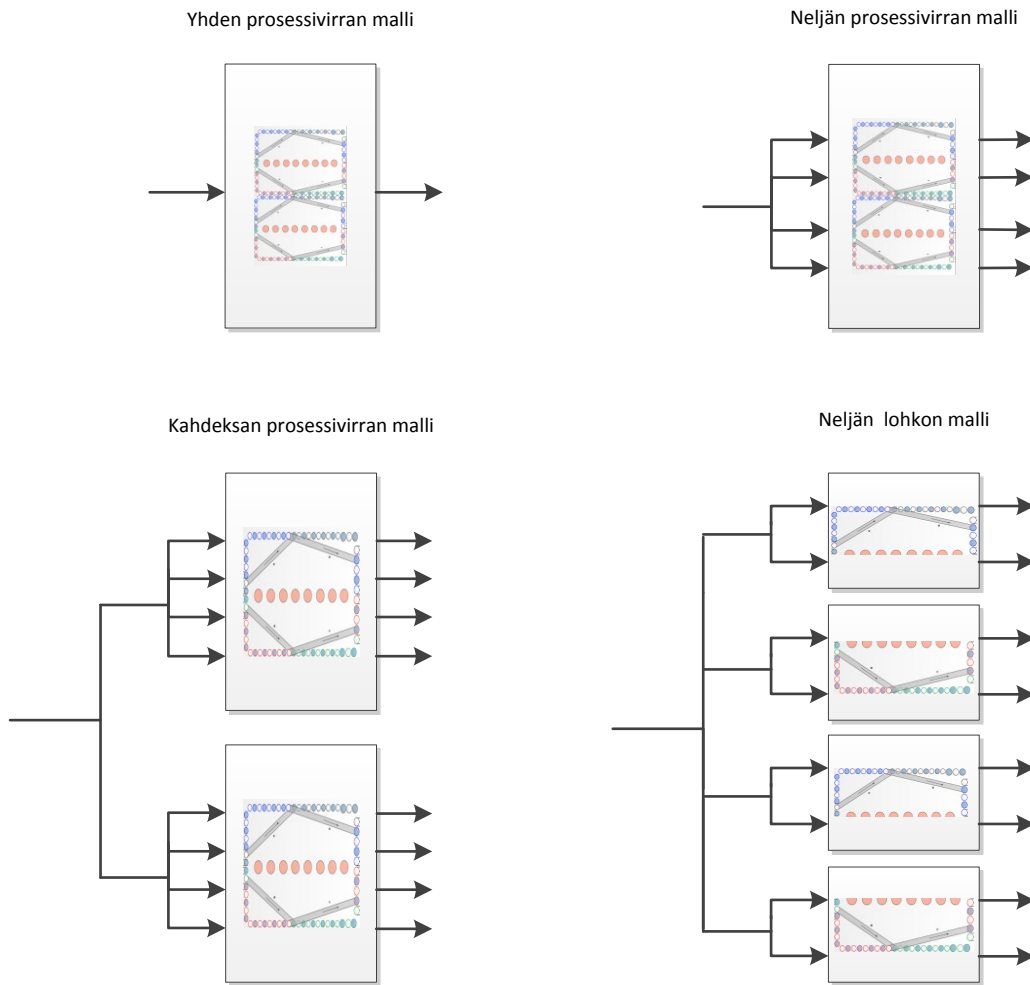
pienimmän ja suurimman virtauksen ero on jopa 20 %. Täten malliin saadaan huomattavaa lisätarkkuutta, jos virtaukset pystytään määrittämään oikean suuruiseksi eri läpikäynneille. Vastaavasti syöttöpaine pystytään määrittelemään läpikäynneittäin, jolloin pystytään mallintamaan virtojen osittainen höyrystyminen ennen uunia.

Prosessiuunin säteily- ja konvektio-osan tuubien pintalämpötiloja mallintamalla voidaan tarkastella mallin ja prosessiuunin välisten mittausten yhdenmukaisuutta. Pintalämpötilat ovat myös tärkeitä käytettäessä mallia ennustamiseen, sillä tuubin liian korkea pintalämpötila vahingoittaa tuubimateriaalia ja voimistaa prosessiaineen koksautumista.

Uunien ulostulolämmöt liittyvät olennaisesti prosessipuolen lämpötehon mallintamiseen. Simulointiohjelman rajoitteena on, että jaettaessa prosessivirta osiin pystytään kiinnittämään vain yhden virran lämpöteho ja simulointiohjelma laskee muut lämmön siirtymien avulla.

7.2 Säteilyosan mallinnusvaihtoehdot

Mallinnettavien prosessiuunien käytössä on huomattu, että läpikäyntikohtaisissa virtauksissa on suuria eroja. Simulointiohjelman rajoituksista johtuen näitä eroja kuvaavaa kokonaismallia ei pystytä rakentamaan vaan malli täytyy koota pienemmistä osista. Kuvassa 20 on esitetty neljä eri tapaa mallintaa prosessiuunin säteilyosa käytettävissä olevalla uunin mallinnusohjelmalla. Yhden prosessivirran mallia käytettäessä pystytään yksittäinen uuni mallintamaan kokonaisuutena. Tällä vaihtoehdolla ei pystytä mallintamaan virtausmäärien tai koksautumisen eroja läpikäynneissä.



Kuva 20. Säteiliosan mallinnusvaihtoehdot. Laatikko kuvaa erillistä simulointimallia

Neljän prosessivirran mallissa virtausmääriä ja koksautumista pystytään mallintamaan hieman tarkemmin kuin yhden prosessivirran simulointimallilla. Tällöin kuitenkin konvektio-osan mallintamisessa verrattuna yhden virran malliin syntyy eroja, josta kerrotaan enemmän seuraavassa luvussa. Malli ei myöskään enää osaa yhdistää virtauksia, jolloin virtojen jälkeensä yhdistäminen vaatii ohjelman ulkopuolista laskentaa.

Kahdeksan prosessivirran mallissa uunin lohkot on jaettu omiin osamalleihinsa. Jaettaessa uuni lohkojen rajalta säteiliosan mallintamisessa ei synny laskennallista eroa verrattuna yhden prosessivirran malliin, sillä mallinnusohjelman laskentaan vaikuttavat tekijät eivät muutu. Kahdeksan prosessivirran mallissa jokainen

kahdeksasta läpikäynnistä pystytään mallintamaan erikseen ja näin saadaan tarkasti mallinnettua kokaantumisen ja virtausten eroja. Säteilyosan mallintamiseen tarvittavien osamallien määrä nousee kahteen.

Neljän lohkon mallissa prosessiuunin säteilyosan lohkot jaetaan vielä kahteen osaan. Tällöin voidaan kiertää mallinnusohjelman tuubiryhmärajoitteet ja säteilyosan katossa oleva yksittäinen tuubi pystytään mallintamaan erikseen. Säteilyosan mallintamiseen tarvittavien osamallien määrä nousee neljään.

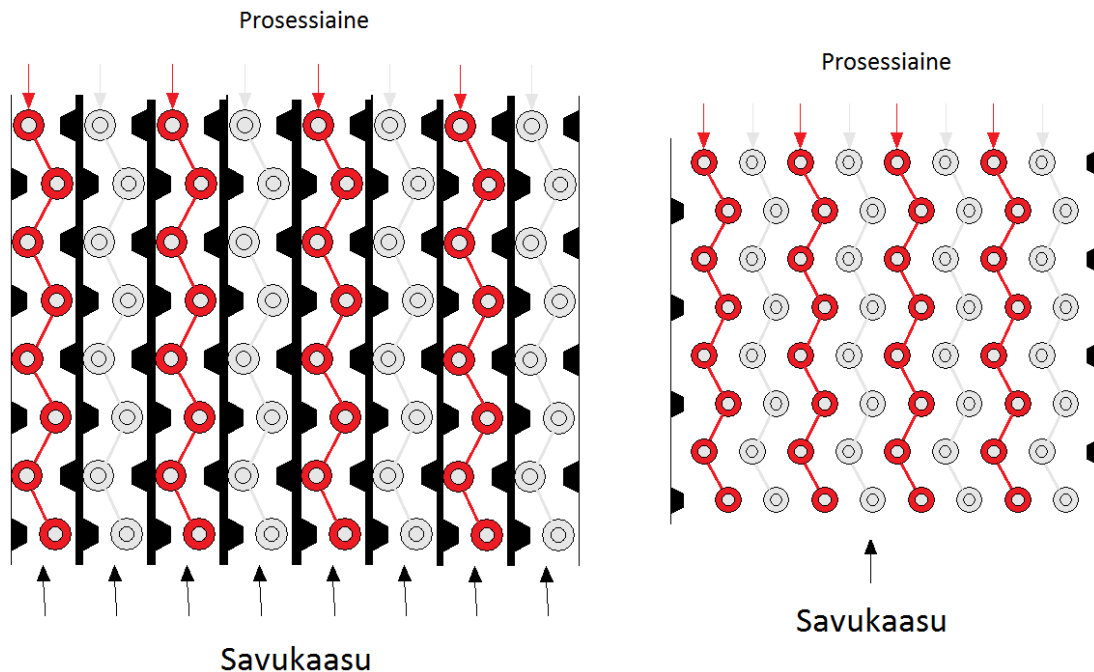
7.3 Konvektio-osan mallinnusvaihtoehdot

Konvektio-osan läpikäyntien virtauserojen mallintaminen onnistuu simulointiohjelmalla säteilyosaa yksinkertaisemmin. Kaikki vaihtoehdot pystytään toteuttamaan yhdellä simulointimallilla.

Konvektio-osa on jaettu savukaasun virtauksen osalta kahteen lohkoon säteilyosan lohkojen mukaan. Tästä huolimatta konvektio-osan tuubit kulkevat molempien lohkojen läpi. Tämän vuoksi konvektio-osaa ei pysty järkevästi jakamaan useampaan simulointimalliin. Tämä ei onneksi ole tarpeen, sillä toisin kuin säteilyosassa, rinnakkaisten konvektio-osien mallintaminen yhdellä mallilla onnistuu suhteellisen yksinkertaisesti ilman, että lohkokokoiset tuubiryhmärajoitukset tulevat vastaan. Ero mallivaihtoehtojen välillä muodostuu erillisten virtausten määrästä, jolloin jokainen virtaus pystytään määrittämään erikseen.

Virtauksen jakaminen ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton. Jaettaessa virtaus rinnakkaisiin läpikäynteihin, joilla jokaisella on oma virtausmääränsä, syntyy yhden virran mallin ja jaetun mallin lämmönsiirtymisen välille eroa. Tämä johtuu siitä, että ohjelma ei mallinna savukaasun virtausta tällöin aivan samalla tavalla. Kuvassa 21 on havainnollistettu yhden ja kahdeksan prosessivirran mallien eroja. Mallinnettaessa konvektio-osaa erillisinä kanavina simulointiohjelma laskee jokaiselle kanavalle lämpöhäviöt ulkoilmaan vaikka todellisuudessa lämpöhäviötä tapahtuu pääasiassa

vain reunimmaisista osista. Mallia pystytään tarkentamaan säätämällä käsin keskimmäisten lohkojen lämpöhäviöt hyvin pieniksi.



Kuva 21. Havainnollistava kuva sivultapäin konvektio-osasta yhden prosessivirran ja kahdeksan prosessivirran mallinnuksen eroista.

7.4 Kokonaismalli

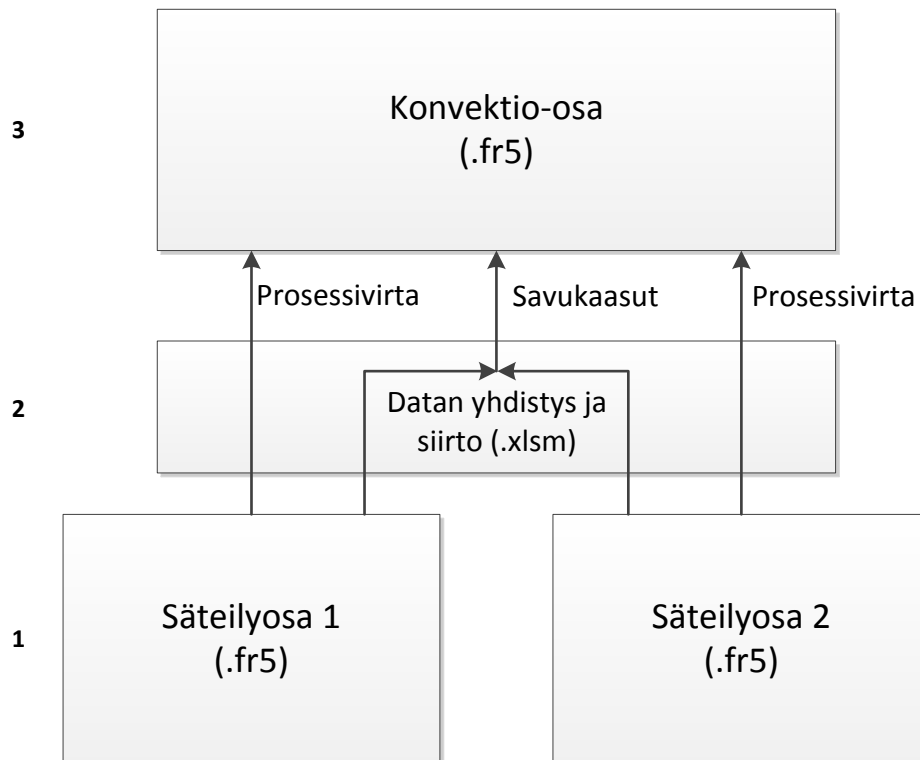
Säteily- ja konvektio-osan osamalleista voidaan muodostaa kokonaismalli yhdelle ja neljälle prosessivirralle yhdellä simulointitiedostolla. Tarkempi kahdeksan prosessivirran malli vaatii vähintään kolme erillistä osamallia, joiden välillä täytyy tehdä laskentaa ja tiedonsiirtoa. Tämä hidastaa tulosten saamista mallista. Tulosten saamista pystytään nopeuttamaan hyödyntämällä työssä käytetyn simulointiohjelmiston automaattiajoo. Automaattiajon tehokas hyödyntäminen vaatii kuitenkin erillistä ohjelmointia, sillä ohjelmassa ei ole valmiina automatisoituja tiedonsiirto-ominaisuuksia.

Neljän prosessivirran mallia käytettäessä pitää valita, minkä kahden virran keskiarvoja käytetään. Kuten luvussa 6 kerrottiin, samassa lohossa sijaitsevat läpikäynnit eivät ole identtisiä säteilylämmönsiirron perusteella. Lohkot ovat

kuitenkin keskenään identtisiä, jolloin kaksi geometrialtaan identtistä läpikäyntiä kannattaa valita eri lohkoista. Tällöin on oletettava, että molemmissa lohkoissa on identtinen määrä polttimia päällä ja lohkojen polttoteho on sama. Kuvan 17 mukaan seuraaville läpikäyntipareille on kannattavinta laskea virtauksen keskiarvot: A&H, B&G, C&F ja D&E.

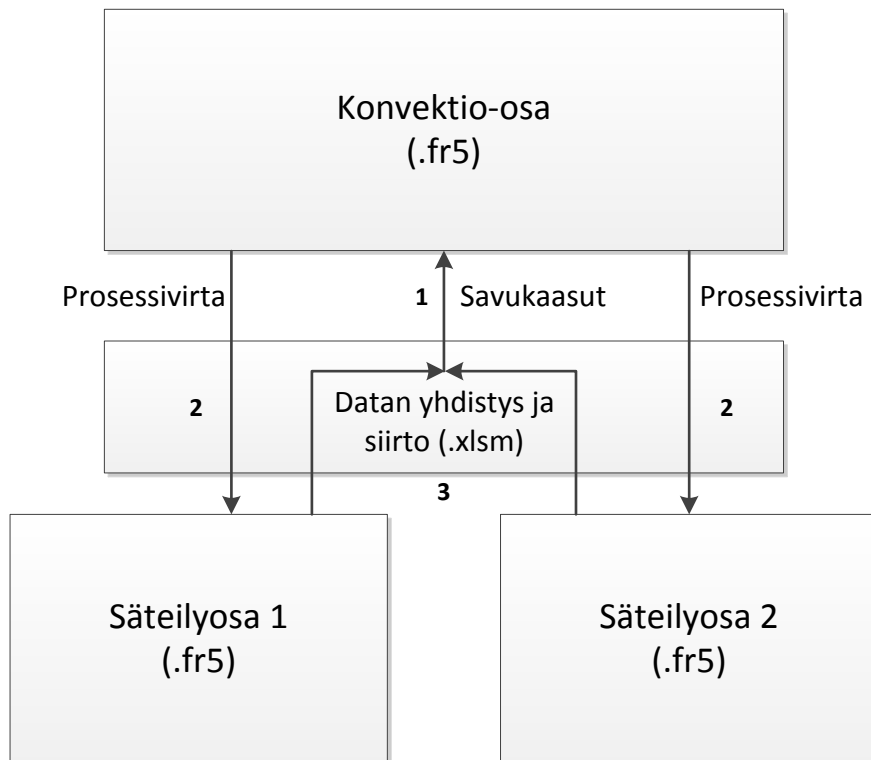
Tarkempi kahdeksan prosessivirran mallin toimintaperiaate riippuu siitä, kiinnitetäänkö prosessivirtojen lämpötilat ja paineet sisäänmenossa vai ulostulossa. Jos lämpötilat ja paineet kiinnitetään sisäänmenossa, tulosten saaminen mallista vaatii iteroimista. Kiinnitettäessä ulostulovirtojen lämpötilat ja paineet iterointia ei tarvita.

Kuvassa 22 on esitelty kahdeksan virran kokonaismallin toimintaperiaate, kun ulostulovirtojen lämpötila ja paine on kiinnitetty. Ensin simuloidaan molemmat säteilyosat (1). Näistä saadut prosessivirtojen lämpötilat ja paineet siirretään Excelin kautta (2) konvektio-osan simulointitiedostoon. Samassa vaiheessa Excel yhdistää myös savukaasujen lämpötilat ja polttotehot. Lopuksi simuloidaan konvektio-osa ja saadaan lopulliset tulokset (3).



Kuva 22. Kahdeksan virran kokonaismallin toimintaperiaate, kun lämpötilat ulostulovirroissa on kiinnitetty. Nuolet kuvaavat tiedonsiirron suuntaa.

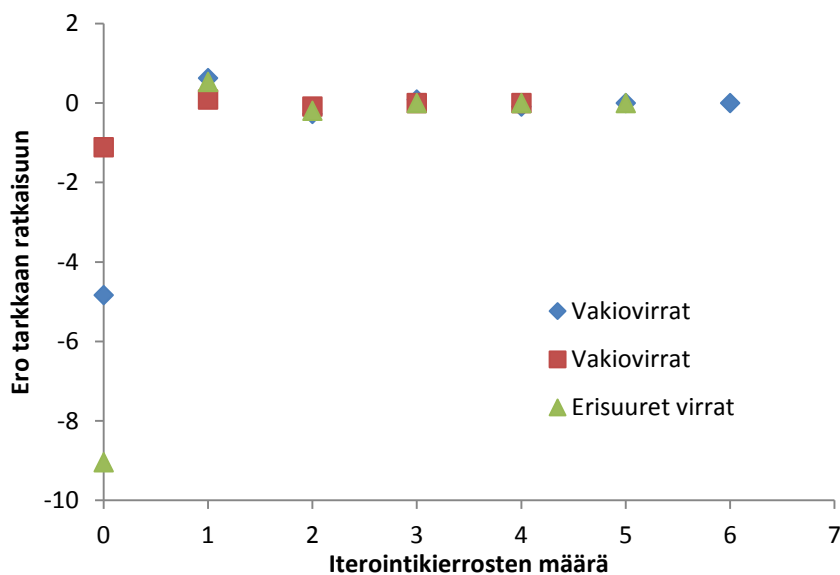
Kuvassa 23 on esitelty kahdeksan virran kokonaismallin toimintaperiaate, kun sisäänmenovirtojen lämpötila ja paine on kiinnitetty. Ensin konvektio-osan osamallille arvataan lähtöarvot polttoteholle ja konvektio-osaan saapuvan savukaasun lämpötilalle (1). Konvektio-osan osamallista saadaan syöttölämpötilat ja -paineet kahteen erilliseen säteilyosan osamalliin (2). Osamallien yhteenlaskettu polttoteho sekä keskiarvo savukaasun lämpötilasta syötetään takaisin konvektio-osan osamalliin (3). Iterointia jatketaan, kunnes lasketun polttotehon ero aikaisempaan tulokseen ei ole haluttua konvergenssikriteeriä suurempi.



Kuva 23. Kahdeksan virran kokonaismallin toimintaperiaate, kun lämpötilat sisäänmenovirroissa on kiinnitetty. Nuolet kuvaavat tiedonsiirron suuntaa.

Kahdeksan prosessivirran kokonaismallin tehokasta hyödyntämistä varten osamallien simulointien välille rakennettiin tapa siirtää tietoa osamallien tulos- ja lähtöarvotiedostojen välillä. Myös kokonaisuuden parempaa hallintaa varten haluttiin yksi sijainti, josta kaikkia osamalleja pystyi ajamaan. Alustaksi valittiin *Microsoft Excel* -taulukkolaskentaohjelma sen visuaalisen selkeyden ja aikaisemman osaamisen perusteella. Siirto-Excel kerää mittaustiedot TOP-järjestelmästä, syöttää tiedot osamalleihin, ajaa mallit halutussa järjestyksessä, siirtää tietoa osamallien tulosten välillä ja kerää yhteen lopulliset tulokset. Tiedonsiirto lähtöarvotiedostoihin ja osamallien ajo toteutettiin *Visual Basic for Applications* (VBA) -ohjelmointikielellä. Osamallien tulos-Excelit linkitettiin suoraan siirto-Exceliin soveltuvilta osin. Osa halutuista tuloksista oli saatavilla vain tekstitiedostomuodossa, joten niiden keräämiseen tehtiin oma makro.

Kokonaismallin konvergoitumisen nopeutta testattiin kahdella eri tapauksella. Ensimmäisessä tapauksessa prosessivirrat olivat yhtä suuret kaikkiin läpikäynteihin. Toisessa tapauksessa prosessivirrat erosivat toisistaan, mutta kokonaisvirtaus oli molempiin säteilyosan osamalleihin yhtä suuri. Testaus suoritettiin kokeilemalla eri lähtöarvauksia polttoteholle ja iteroimalla, kunnes polttoteho erosi edelliseen tulokseen nähden alle 0,1 %. Kuvasta 24 voidaan huomata, että suhteellisen tarkalla alkuarvauksella iterointikierroksien määrä vähenee yhdellä. Kokonaismalli myös iteroituu yhtä nopeasti läpikäyntien virtausten ollessa eri suuria. Iteroinnin tarkkuus ei parane enempää lisäämällä iterointikierroksia, koska tulokset pysyvät täysin samoina. Tämä johtuu siitä, että simulointiohjelma antaa tulokset vain muutamien desimaalien tarkkuudella, jolloin lähtöarvoja ei pysty tarkentamaan.



Kuva 24. Kahdeksan virran kokonaismallin iteroitumisen nopeus eri lähtöarvoilla ja lähtötilanteilla.

7.5 Mallinnusvaihtoehtojen vertailu

Taulukkoon 2 on koottu aiemmissa luvuissa esiteltyt mallinnusvaihtoehtojen erot. Taulukosta nähdään, että erittäin pienellä käytettävyyden heikkenemisellä päästään huomattavasti tarkempaan tulokseen neljän prosessivirran mallinnusvaihtoehdolla. Vielä tarkempaan kahdeksan prosessivirran kokonaismalliin siirryttäessä, mallin

monimutkaisuus kasvaa jo tuntuvasti. Monimutkaisen mallin käytettävyyttä voidaan parantaa automatisoimalla iterointivaihe ja hyödyntämällä yksinkertaisempaa mallia tarkempien lähtöarvojen valikoinnissa.

Taulukko 2. Mallinnusvaihtoehtojen ominaisuuksien vertailu. Vihreän edustaessa parasta ja punaisen huonointa vaihtoehtoa.

	Likaantuminen	Virtausmäärät ja paineet	Pintalämpötilat	Ulostulolämpötilat	Polttimen sammuttamisen mallinnus	Käytettävyys
Säteilyosa						
Yhden prosessivirran malli	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	Ei onnistu	Yksinkertainen
Neljän prosessivirran malli	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Ei onnistu	Melko yksinkertainen
Kahdeksan prosessivirran malli	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Mahdollista, mutta työlästä	Monimutkainen
Jaettun lohkon malli	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Tarkemmin mallinnetut sisäosat	Joka virralle erikseen	Mahdollista, mutta työlästä	Erittäin monimutkainen
Konvektio-osa						
Yhden prosessivirran malli	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	-	Yksinkertainen
Neljän prosessivirran malli	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	-	Melko yksinkertainen
Kahdeksan prosessivirran malli	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	-	Melko yksinkertainen
Kokonaismallit						
Yhden prosessivirran malli	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	Ei onnistu	Yksinkertainen
Neljän prosessivirran malli	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Kahden virran keskiarvo	Ei onnistu	Melko yksinkertainen
Kahdeksan prosessivirran malli	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Joka virralle erikseen	Mahdollista, mutta työlästä	Monimutkainen

Useimmissa tapauksissa mallien väleille syntyy laskentaan liittyviä eroja, kun yhden prosessivirran mallia lähdetään jakamaan useampia virtoja sisältäväksi. Poikkeuksen tähän tekevät säteilyosan neljän virran malli ja kahdeksan virran malli, kun jako tehdään lohkorajalta. Tällöin samoilla lähtöarvoilla saadaan identtiset tulokset, koska simulointiohjelma mallintaa tapaukset samalla tavalla. Jos kahdeksan prosessivirran mallissa lohkot jaetaan vielä erikseen osiin, syntyy laskentaan huomattavaa eroa yhden prosessivirran tapaukseen verrattuna. Mallinnettaessa prosessiuunin säteilyosan toinen lohko kahdessa osassa polttoteho oli 2,1 % pienempi verrattuna

kahden lohkon malliin. Tämä vastaa 1,3 MW tehoeroa simulointien välillä aiheuttaen 770 tonnin eron polttokaasun kulutukseen vuositasona.

Konvektio-osassa mallien välille syntyy eroa aiemmassa luvussa 7.2 esitellyn savukaasujen jakautumisen ja lämpöhäviöiden mallinnuksen eroista johtuen. Vaikka lämpöhäviöiden mallintamista voidaan yhtenäistää molemmilla malleilla, lämmön siirtymisessä on silti eroa mallien välillä. Siirtyneen tehon ero yhden virran tapaukseen verrattuna oli neljän virran mallilla 0,25 % ja kahdeksan virran mallilla 0,93 %.

Kokonaismalleilla erot tasoittuvat verrattuna konvektio-osan ja säteilyosan osamalleihin. Polttotehojen ero yhden virran kokonaismallin ja neljän sekä kahdeksan virran kokonaismallin välillä oli 0,06 % ja 0,07 %. Ero tuloksissa on niin pieni, että siihen vaikuttavat jo simulointiohjelman konvergenssikriteerit. Siirtyneen kokonaistehon osalta ero on hieman suurempi kahdeksan virran kokonaismallilla ollen 0,22 %. Absoluuttisesti ero on suunnilleen sama kuin konvektio-osan osamallissa. Taulukossa 3 on kootusti esitelty laskennalliset erot, joita muodostuu verratessa yhden virran mallia useamman virran malleihin.

Taulukko 3. Mallien laskentaan liittyvät erot yhden prosessivirran malliin verrattaessa.

	Polttotehon ero (%)	Siirtyneen kokonaistehon ero (%)
Säteilyosa		
Yhden prosessivirran malli	-	-
Neljän prosessivirran malli	0	-
Kahdeksan prosessivirran malli	0	-
Jaettun lohkon malli	2,14	-
Konvektio-osa		
Yhden prosessivirran malli	-	-
Neljän prosessivirran malli	-	0,25
Kahdeksan prosessivirran malli	-	0,93
Kokonaismallit		
Neljän prosessivirran malli	0,07	0,03
Kahdeksan prosessivirran malli	0,06	0,22

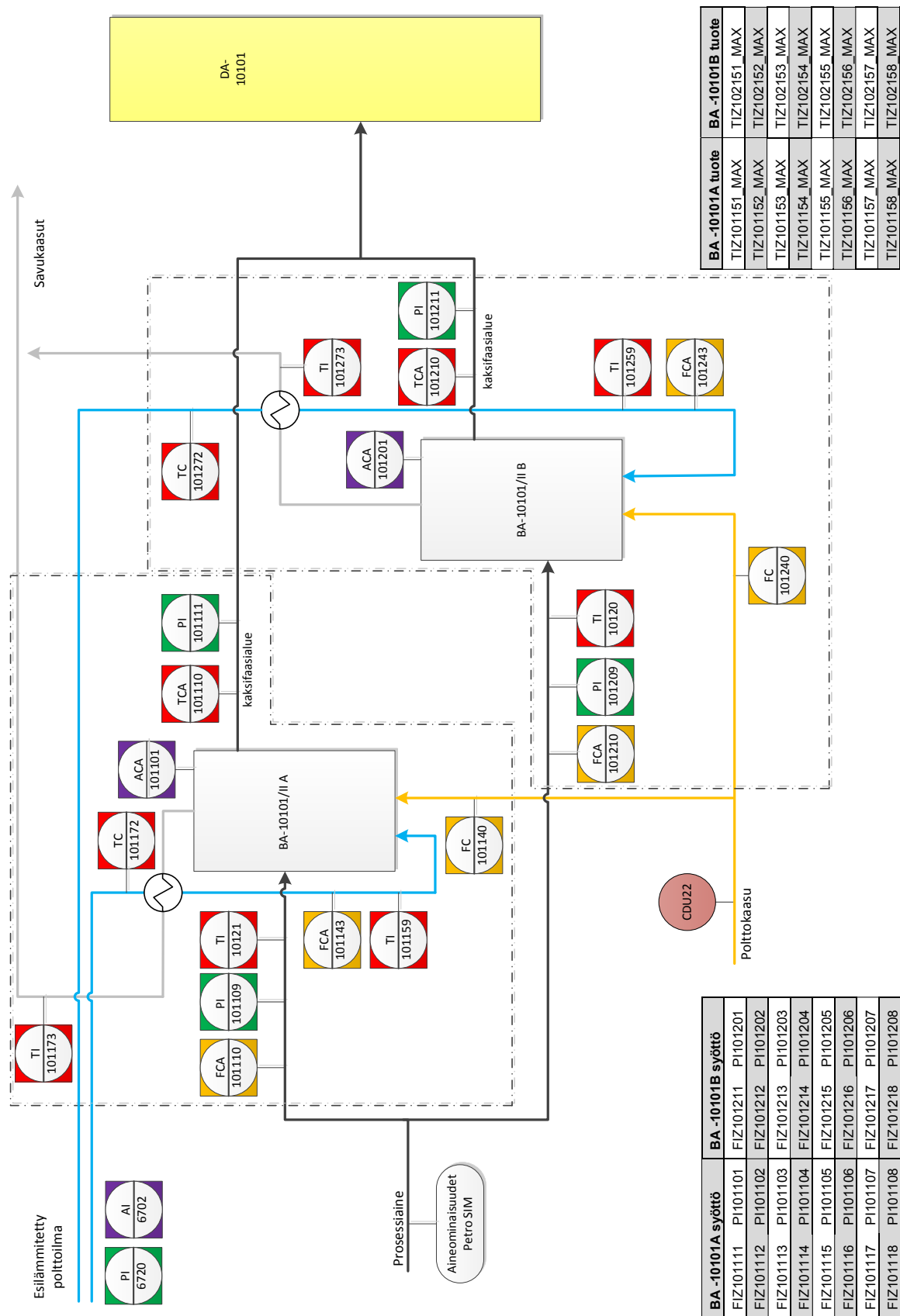
Tulokset tukevat joko jaetun neljän virran mallin tai jakamattoman kahdeksan virran mallin hyödyntämistä. Jaettaessa prosessiuuni näitä pienempiin osiin menetetään tarkemmasta sisäosien mallinnettavuudesta saatava hyöty. Tämä johtuu siitä, että jaettaessa prosessiuunin lohko osiin, ei uunin geometria mallinnu oikein. Geometrian vaikutus pystytään ottamaan huomioon muokkaamalla säteilylämmönsiirron vaikutusta, mutta tällöin sisäosien tarkempi mallinnus menettää merkityksensä.

Tulosten perusteella päätettiin mallintaa uuni kahdeksan prosessivirran mallilla, kuitenkin niin että ensimmäiset alkuarvaukset simuloidaan yksinkertaisemman neljän prosessivirran mallin avulla. Tämän jälkeen alkuarvauksina käytetään aina aikaisempia mallilla simuloituja tuloksia.

8 Prosessiuunimallin viritys

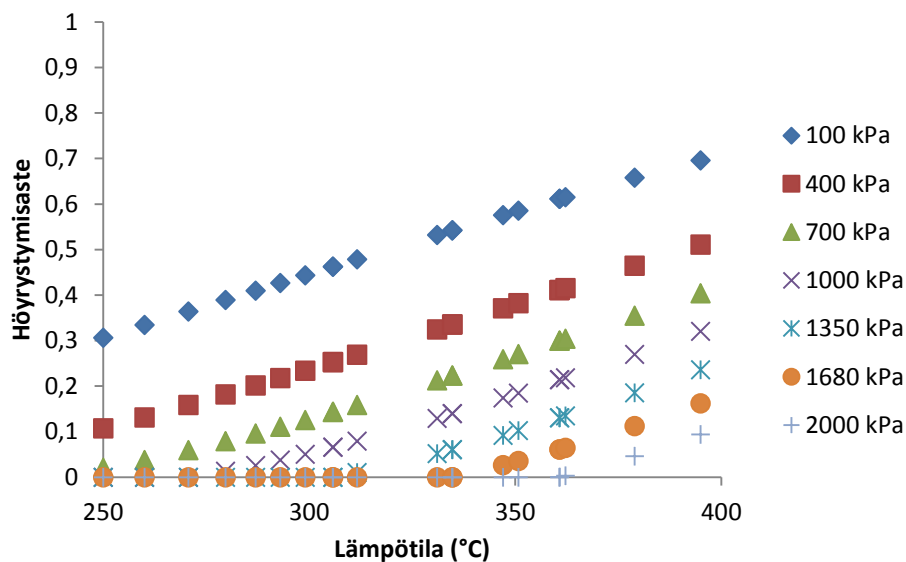
Tässä luvussa määritellään simuloinnin tasealue, taseen virittämiseen käytettävät parametrit ja testataan tuloksia useammalla eri tasepäivän mittauksilla.

Prosessiuunit BA-10101/II A ja B on jaettu kuvan 25 mukaan omiin tasealueisiinsa. Yhteistä molemmille malleille on prosessiaineen, polttokaasun ja polttoilman ominaisuudet. Kuvaan on merkitty kaikki mittaukset, jotka toimivat lähtötietoina simulointimallille.



Kuva 25. Prosessiunien taseet.

Luvussa 7.5 valitulla mallinnustavalla prosessiuunista BA-10101/II A rakennetaan mahdollisimman tarkka malli. Mallin tarkkuutta arvioidaan vertaamalla simuloinnin tuloksia prosessiuunista saatuihin mittaustietoihin. Ensimmäiseksi tasepäiväksi valittiin 30.12.2015. Kyseisenä päivältä kerättiin tunnin ajalta mittausdata sekä polttokaasun ja prosessiaineen analyysitulokset. Prosessiaineen analyysistä mallinnettiin Petro-Sim-ohjelmalla aineominaisuudet seitsemässä eri paineessa, kahdellakymmenellä eri lämpötilalla siten, että prosessiuunissa esiintyvät paine- ja lämpötilatasot saatiin mahdollisimman tarkasti huomioitua. Jos valitun paineen lämpötila-alueelle osui kuplapiste, tämä lämpötila lisättiin ominaisuustaulukkuun. Kuvassa 26 on esimerkkinä höyrystymisasteen pistesarja valituissa paine- ja lämpötilatasoissa.



Kuva 26. Tasepäivän 30.12.2015 prosessiaineen höyrystyminen eri paineissa ja lämpötiloissa.

Ensimmäisessä malliversiossa kiinnitettiin prosessiaineen ulostulovirtojen lämpötilat ja virtausmäärät sekä polttokaasun ja polttoilman lämpötilat ja virtausmäärät. Kuvassa 27 on esitelty tulokset perustapaukselle, joka käyttää simulointiohjelman oletusarvoja. Tuloksista nähdään, että simulointiohjelman laskemat sisäänmenolämpötilat poikkeavat huomattavasti mitatuista lämpötiloista. Todellisuudessa prosessiviran sisäänmenolämpötila kaikkiin läpikäynteihin on sama.

Mallin perustapauksessa ero suurimman ja pienimmän sisäänmenolämpötilan välillä on 44 °C. Ero johtuu säteilyosan läpikäyntien epäsymmetrisyydestä, jota mallin perustapaus ei huomioi. Seuraavassa luvussa on esitelty eri tapoja, jolla voidaan huomioida läpikäyntien epäsymmetrisyyttä.

8.1 Säteilylämmönsiirron mallintaminen

Simulointiohjelmassa säteilemällä savukaasuista tuubin pinnalle tapahtuvaan lämmönsiirtoon voidaan vaikuttaa kolmella eri parametrilla:

- Vapaan uuninseinämäpinta-alan suhde kylmään pintaan (engl. Free refractory to equivalent cold plane area ratio, BETA)
- Savukaasun keskimääräinen leveys (engl. Mean beam length, MBL)
- Lämpövuon kerroin (engl. Flux multiplier)

Vapaan uuninseinämäpinta-alan suhdetta kylmään pintaan -parametria käytetään kokonaisvaihtokertoimen (engl. Overall exchange factor) laskemiseen. Parametri kertoo kuinka suuren osa prosessiuunin seinämistä savukaasu näkee suhteessa kylmiin tuubeihin. Parametri määritellään suljetulle tilalle ja on siten sama kaikille tuubeille, jotka sijaitsevat samassa tilassa. Tämän vuoksi läpikäyntikohtaisten erojen korjaaminen BETA parametria muuttamalla korreloi huonosti todellisuuden kanssa.

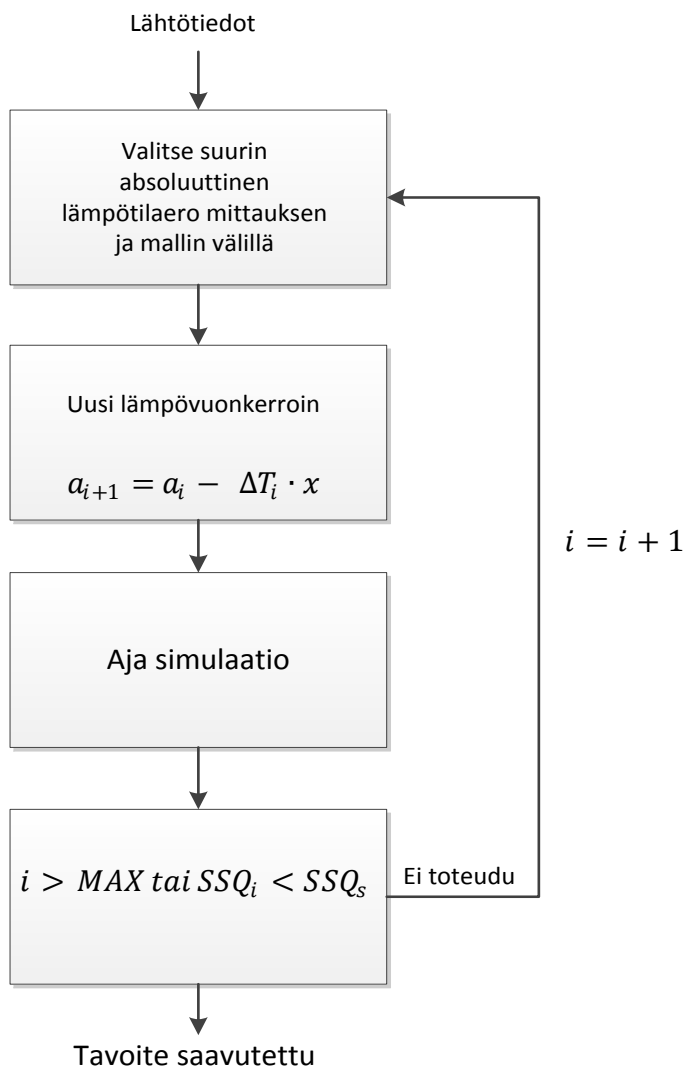
Savukaasun keskimääräisellä leveydellä tarkoitetaan tarvittavaa ekvivalenttia ympäröivän aineen puolipallon sädettä, jonka keskustaan kohdistuva lämpövuoto on sama kuin tarkasteltuun pintaan kohdistuva keskimääräinen lämpövuoto todellisella kaasutilavuudella. MBL-parametrilla pyritään huomioimaan uunin geometrian vaikutus säteilylämmön siirtymiseen isotermisen kaasutilavuuden ja tuubien rajapinnan välillä. (Yuen, 2008) Tarkastellun uunin osalta simulointiohjelman laskema MBL kuvaa suhteellisen tarkasti uunin todellista geometriaa, sillä uunin lohkot ovat muodon ja savukaasun tilavuuden osalta identtiset.

Lämpövuon kerroin muuttaa lämpövuon tuubiryhmäkohtaista jakautumista. Esiasetuksena kerroin on kaikille tuubiryhmille yksi. Tuubiryhmäkohtaiset lämpövuon kertoimien kokonaisvaikutus riippuu kertoimien suhteesta. Jos säteilyosan kaikille tuubiryhmille antaa kertoimeksi saman arvon esimerkiksi kaksi, lopullinen tulos on sama kuin esiasetuksella. Tämän vuoksi lämpövuon kertoimia muuttamalla voidaan päästä samaan tulokseen useammalla kombinaatiolla. Tämä parametri soveltuu

parhaiten energiataseen virittämiseen säteilyosan osalta, koska se vaikuttaa lämpövuohon suoraan eikä välillisesti, kuten BETA ja MBL.

8.2 Energiataseen viritys

Energiataseen virittämisellä pyritään saamaan simuloitu prosessipuolen prosessiaineen tehon muutos vastaamaan mitattua prosessiaineen tehon muutosta. Kuvassa 28 on virityskaavio, jossa energiataseen virityksen toimintaperiaate on kuvattu. Viritys tapahtuu minimoimalla syöttölämpötilojen mittauksen ja mallin antaman arvon eroa muuttamalla lämpövuon kerrointa.



Kuva 28. Virityskaavio energiataseen virityksen toimintaperiaatteesta.

Virityksen tehostamiseksi ohjelmoitiin VBA-ohjelmointikielellä algoritmi, joka suorittaa minimoimisen automaattisesti. Kahdeksan prosessivirran kokonaismallissa säteilyosa on jaettu kahteen erilliseen osamalliin, joiden välillä ei tapahdu tiedonsiirtoa. Algoritmi vertaa erikseen molempien osamallien läpikäyntien ulostulolämpötiloja ja muuttaa itseisarvoltaan suurinta lämpötilaeron läpikäynnin lämpövuonkerrointa yhtälön (27) mukaan. Tämän jälkeen ohjelma ratkaisee kokonaismallista tulokset ja vertaa uudelleen lämpötilaeroja. Algoritmi pyörii kunnes haluttu lämpötilojen erotusten neliösumma on alitettu tai ennalta määriteltä enimmäismäärä iterointikierrroksia toteutuu.

$$a_{i+1} = a_i - (\Delta T_i \cdot x) \quad \text{kunnes } i > MAX \text{ tai } SSQ_i < SSQ_s \quad (27)$$

jossa a lämpövuon kerroin

i Iterointikierrros

ΔT mallin ja mittauksen lämpötilaero (°C)

x muutoskerroin

MAX iterointikierrrosraja

SSQ lämpötilaerojen neliösumma

s tavoite

Virittämisessä käytettiin muutoskerrointa 0,075. Mitä suurempi kerroin on, sitä nopeammin lämpötilaero pienenee, mutta liian suuri kerroin aiheuttaa värähtelyä, joka saattaa jopa estää konvergoitumisen. Valitulla muutoskerroimella algoritmin havaittiin konvergoituvan riittävän nopeasti aiheuttamatta värähtelyä.

Taulukossa 4 on esitelty lämpövuon kertoimet, joilla syöttövirtojen lämpötilat saatiin lähelle toisiaan. Kertoimien erot lohkojen välillä johtuvat osittain aiemmin mainitusta useamman ratkaisun mahdollisuudesta. Lohkojen välillä on myös todellisia eroja, sillä identtisilläkin kertoimilla tuloksissa on eroja.

Taulukko 4. Säteiliosan eri läpikäyntien lämpövuon kertoimet, kun mallin energiatase on viritetty.

Läpikäynti	Lämpövuon kerroin
A	0,971
B	1,221
C	1,111
D	0,908
E	0,866
F	1,020
G	1,238
H	0,988

8.3 Painetason viritys

Uunin syötön tarkkaa määrittämistä varten pitää olla tiedossa sekä paine että lämpötila, jotta tiedetään höyrystymisaste. Tarkasteltavalla prosessiuunilla lähin lämpötilamittaus on ennen virtaussäätöventtiiliä. Samastaa kohtaa löytyy myös painemittaus. Toinen painemittaus sijaitsee säätöventtiilin jälkeen, jolloin sitä voidaan hyödyntää venttiilin painehäviön määrittämisessä. Mittausanturien sijainnin perusteella kokonaismallin syöttölämpötila ja -paine määritettiin ennen säätöventtiiliä, ja painehäviö mittauksilta uunia lähimmälle painemittarille määriteltiin painemittausten mittauseron. Lähimmältä painemittaukselta uunin syöttöön on vielä huomattava määrä siirtolinjastoa, jossa on nousukorkeutta noin 16 metriä. Kyseisen siirtolinjaston mallintaminen onnistuu teoriassa käytetyllä simulointiohjelmalla, mutta käytännössä kahdeksan rinnakkaista putkiston linjaa mallintaessa ohjelman tuubirajoitteet tulevat vastaan.

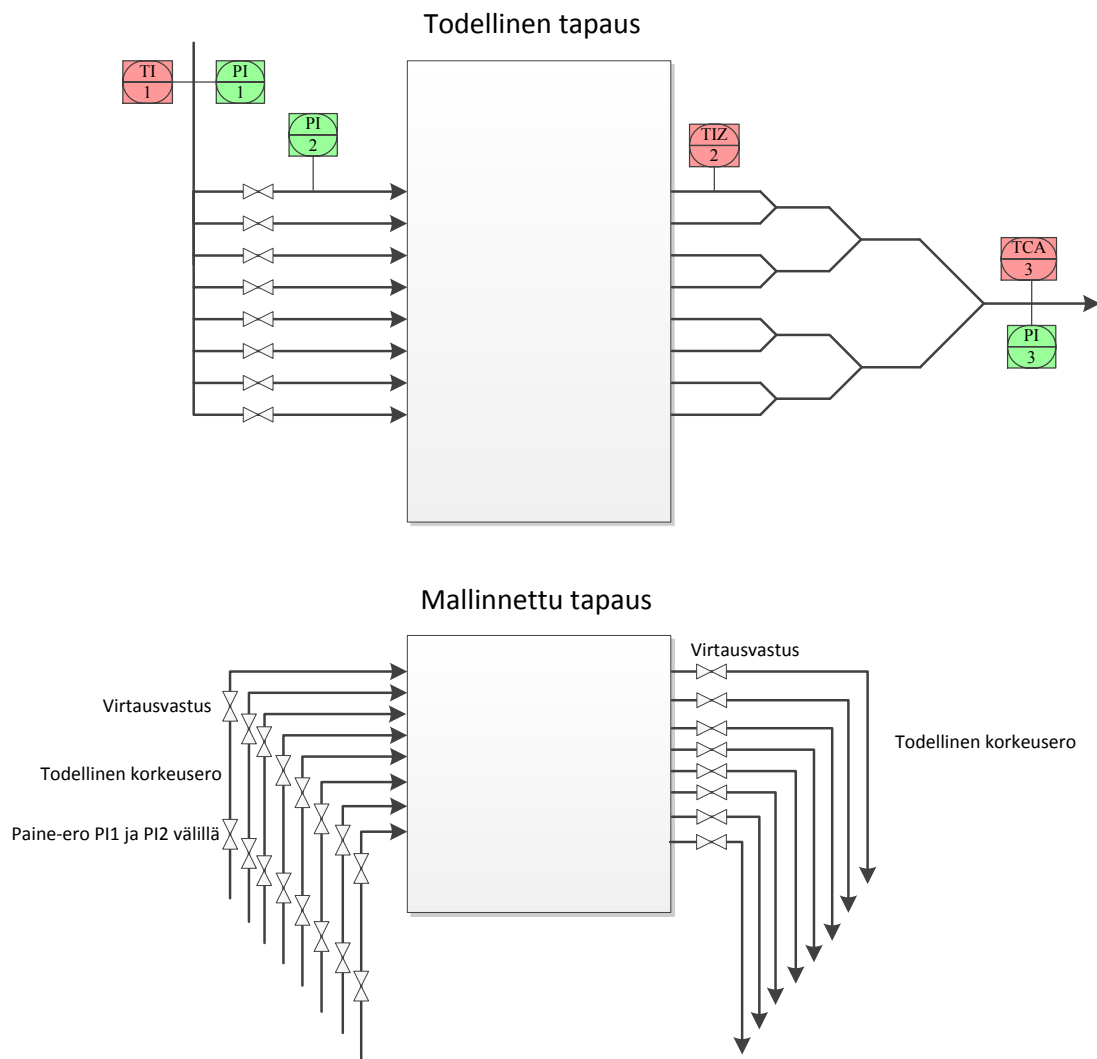
Työssä päädyttiin kuvaamaan tulopuolen syöttölinjoja ekvivalentilla pystyputkella, sekä venttiilillä, joka määritettiin erillisellä putkistomallilla. Taulukosta 5 nähdään, että eri siirtolinjojen välillä painehäviöissä ero on enintään 1 kPa luokkaa. Tämän vuoksi päätettiin määrittää syöttölinjojen ekvivalenttikorkeus ja venttiilin painehäviö vain yhden syöttölinjahaaran perusteella. Pystyputken korkeudeksi määriteltiin

todellinen korkeusero mallinnettavan osuuden eli painemittauksen ja prosessiuunin sisäänmenon välillä. Mutkista ja suorasta osuudesta johtuvaa virtausvastusta kuvattiin venttiilin aiheuttamalla virtausmäärään perustuvalla painehäviöllä.

Taulukko 5. Prosessiuunin syötön eri syöttölinjojen paineet ja höyrystymisasteet uunin syötössä, kun putken alussa on vakio-olosuhteet.

Virta	Lämpötila [°C]	Paine [kPa]	Höyrystymisaste
A	264,5	739,8	0,106
B	264,5	739,7	0,106
C	264,5	739,8	0,106
D	264,6	740,3	0,106
E	264,5	739,7	0,106
F	264,5	739,5	0,106
G	264,5	739,3	0,106
H	264,5	739,5	0,106

Kuvassa 29 on esitelty todellinen putkiston jakautuminen, ja kuinka se on tuubiryhmärajoitteiden puitteissa mallinnettu. Putkistomalliin rakennettiin syöttölinjan lisäksi todellinen siirtolinja ensimmäiselle paine- ja lämpötilamittaukselle asti. Koska ohjelma ei pysty yhdistämään erisuuruisia virtoja keskenään, päätettiin mallintaminen suorittaa jakamalla virta tasan kaikkiin siirtolinjahaaroihin. Tämän mallin painehäviötä verrattiin tapaukseen, jossa virtausvastus on mallinnettu venttiilillä ja korkeusero pystyputkella, jossa virtaus suunta on alaspäin.



Kuva 29. Prosessiuunin syöttö- ja siirtolinjaputkiston todellinen ja mallinnettu tapaus.

Näiden viritystojien jälkeen ero mitatussa ja simuloidussa kokonaispainehäviössä oli yhä 50-80 kPa luokkaa. Lopullinen viritys päätettiin tehdä putkikarheutta ja likakerroksen paksuutta säätelämällä. Uunin käyttöjakson alussa likakerros voidaan olettaa merkityksettömäksi ja viritys kannattaa tehdä vain käyttämällä putkikarheutta. Kun painehäviö on prosessiuunin käyntijakson alussa määritetty putkikarheuden perusteella, voidaan jatkossa viritys suorittaa likaantumiskerroksen paksuudella, olettaen, että likaantuminen on ainoa muuttuva tekijä, jota kokonaismalli ei automaattisesti huomioi.

8.4 Likaantumisvastuksen määrittäminen

Prosessiuunin hyötysuhde yleensä heikkenee käyntijakson edetessä. Merkittävin syy tähän on useimmissa tapauksissa tuubien likaantuminen ja koksautuminen. Likaantumista tapahtuu ajan kuluessa tuubien ulko- ja sisäpinnoille. Suhteellisen puhtaita kaasumaisia polttoaineita käytettäessä tuubien ulkopinnan likaantuminen on vähäistä, jolloin pääasiallinen likaantuminen tapahtuu tuubien sisäpinnoille.

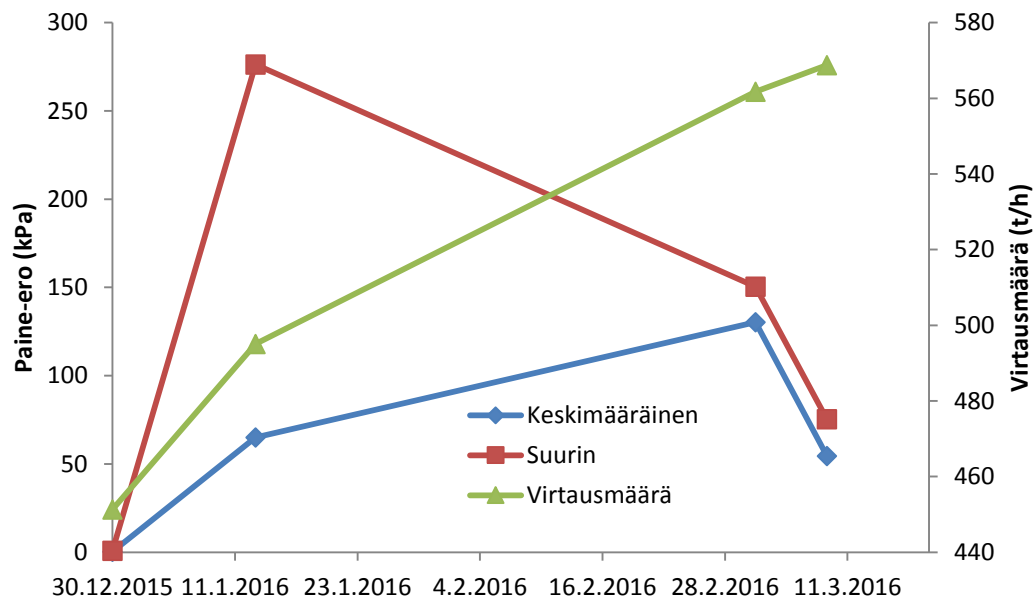
Likaantumisen vaikutus on mahdollista mallintaa määrittelemällä kullekin läpikäynnille oma likaantumisvastus. Tuubin likaantuminen heikentää lämmönsiirtymistä, mikä vaikuttaa jonkin verran absorboituneen tehon määrään, mutta huomattavasti enemmän tuubin pintalämpötiloihin. Tämän vuoksi työssä päätettiin likaantumisen määrittämisessä käyttää tuubien pintalämpömittauksien mitatun ja simuloidun arvon eroa.

Tuubien sisäpuolinen likaantuminen vaikuttaa myös prosessivirran painehäviöön. Käytetyssä simulointiohjelmistossa likaantumisvastus ja likakerroksen paksuus on eroteltu omiksi parametreikseen. Likakerroksen paksuus vaikuttaa suoraan ainoastaan painehäviöön ja likaantumisvastus lämmönsiirtoon. Todellisuudessa likakerroksen paksuus on kääntäen verrannollinen likaantumisvastukseen, joten yhdeksi seurattavaksi parametriksi voidaan valita likaantumisvastuksen ja likakerroksen paksuuden suhde.

9 Mallin toimivuuden tarkastelu

Mallin käyttäytymistä seurattiin virittämällä energiatase ja painehäviö yhdelle tasepäivälle ja käyttämällä saatuja parametreja muina tasepäivinä. Kuvassa 30 on esitelty mittauksen ja mallin syöttöpaineen tulosten keskimääräinen ero sekä suurin läpikäyntikohtainen ero eri tasepäivinä. Kuvasta 30 havaitaan, että paine-eron mallinnus ei vastaa mittauksia virtausmäärien ja höyrystymisasteen muuttuessa. Lisäksi A-uunin F-haaran mittaus ei tasepäivänä 13.1.2016 todennäköisesti anna

oikeaa arvoa, sillä kyseisen läpikäynnin osalta mallin tulokset poikkeavat merkittävästi mitatuista syöttö- ja ulostulolämpötiloista. Tätä olettaa tukee myös F- ja C- virtausmittausten lähes 20 t/h ero, kun yleensä ero on korkeintaan 2 t/h luokkaa sekä F-haaran mitattu paine, joka on liian pieni, jotta mitattu virta olisi mahdollinen.

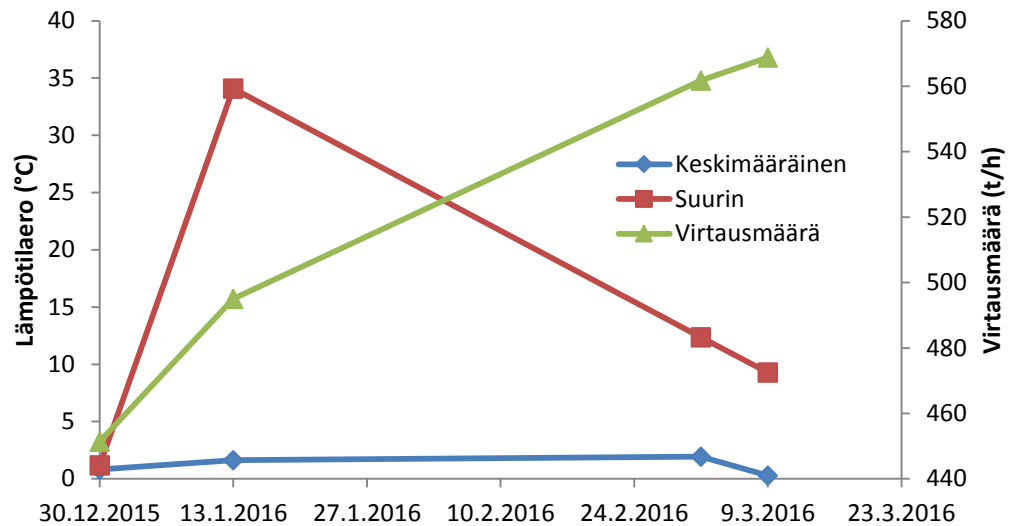


Kuva 30. Simuloinnin ja mittauksen välinen painehäviön ero eri tasepäivinä A-uunilla. Virtausmäärä kertoo uunin kokonaissyötön kullakin tasepäivänä.

Tasepäivien 2.3. ja 9.3. välillä tapahtuvaa paine-eron pienentymistä ei selitä prosessiaineen virtausmäärän muutos, sillä paine-ero pienenee vaikka virtausmäärät kasvavat. Tuloksia lähemmin tarkastellessa suurin ero tasepäivien välillä on uunin ulostulopaineen noin 30 kPa ero. Tasepäivän 9.3. pienemmässä ulostulopaineessa prosessivirta höyrystyy enemmän, mikä vaikuttaa mallin painehäviölaskuihin. Käytännössä vaikuttaa siltä, että simulointimallin painehäviölaskut eivät täysin vastaa todellisuutta.

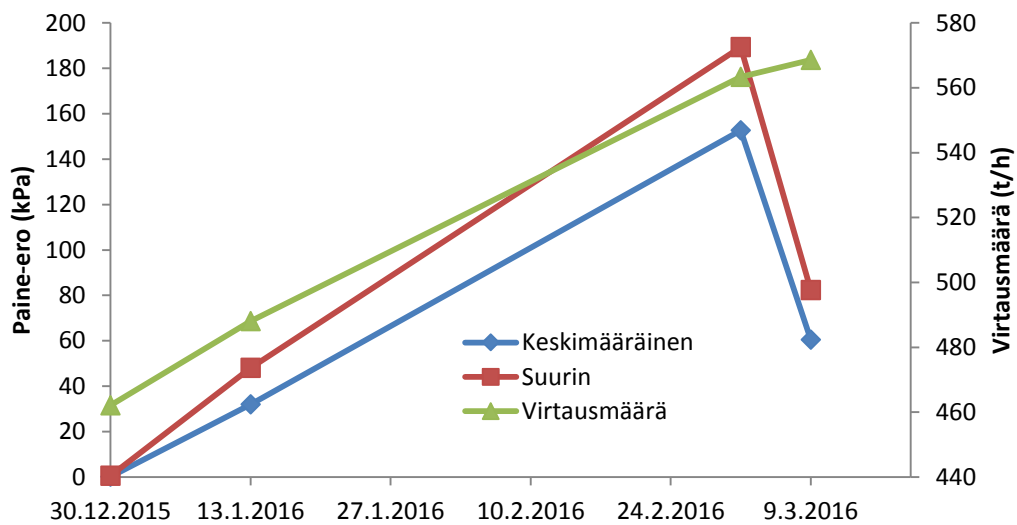
Kuvassa 31 on esitelty syöttöhaarojen syöttölämpötilojen keskimääräinen ja suurin lämpötilaero eri tasepäivinä. Myös tästä kuvasta on selvästi havaittavissa 13.1.2016 tasepäivän mittauspoikkeama. Syöttölämpötiloista on haastavaa tehdä enempää

havaintoja, sillä painehäviölaskennalla on merkittävä vaikutus myös mallinnettuun syöttölämpötilaan.



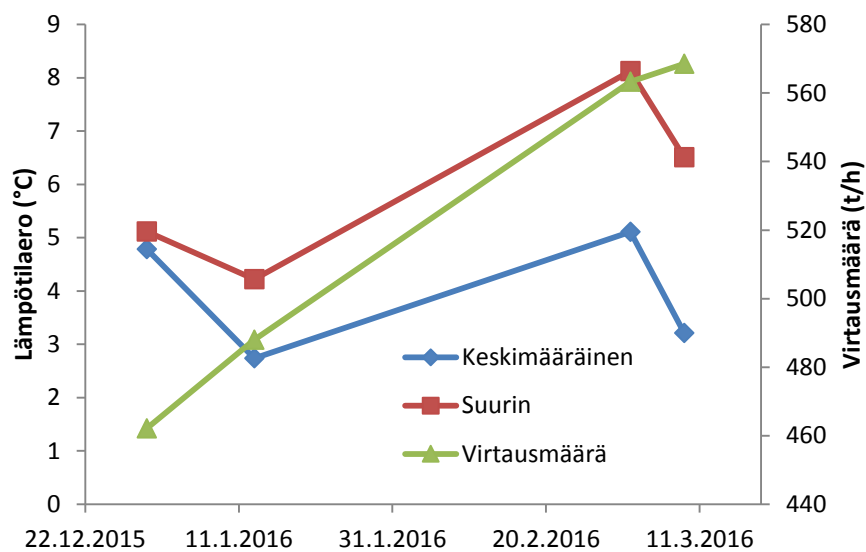
Kuva 31. Simuloinnin ja mittauksen välinen lämpötilaero eri tasepäivinä A-uunilla. Virtausmäärä kertoo uunin kokonaissyötön kullakin tasepäivänä.

B-uunin osalta kuvasta 32 on havaittavissa vastaavaa painehäviön muutosta 2.3. ja 9.3. tasepäivän kohdalla kuin A-uunilla. Myös tässä tapauksessa suurin ero tasepäivien välillä on uunin ulostulolinjan paine.



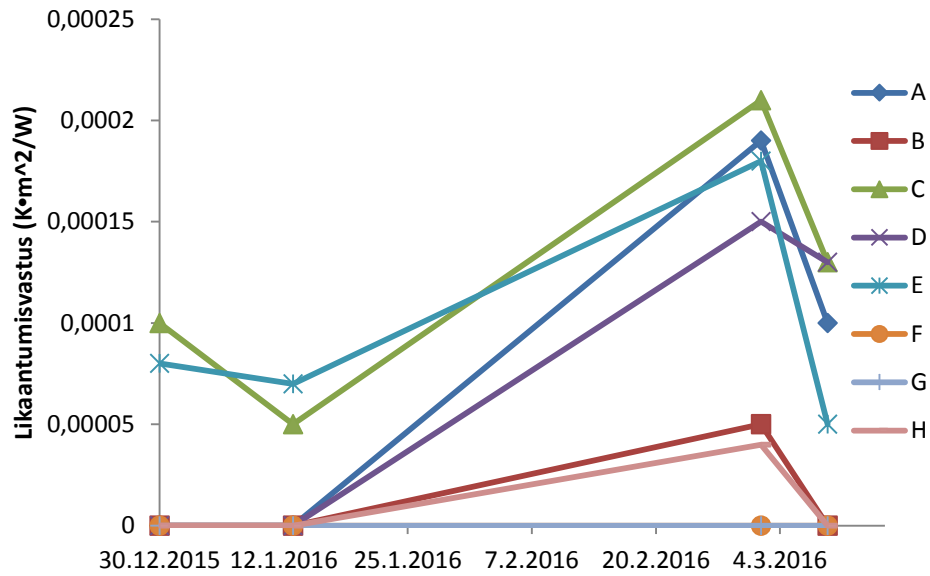
Kuva 32. Simuloinnin ja mittauksen välinen painehäviön ero eri tasepäivinä B-uunilla. Virtausmäärä kertoo uunin kokonaissyötön kullakin tasepäivänä.

Kuvassa 33 esitellyistä B-uunin lämpötilaeroista huomataan, että täsmätylläkin tapauksella malli ja mittaukset eivät kohtaa. Verrattaessa A- ja B-uunia keskenään havaitaan, että B-uunin syöttö on kaikkina tasepäivinä A-uunin syöttöä suurempi, mutta polttokaasun syöttö sitä vastoin pienempi. Tämä voi johtua siitä, että B-uunilla on selvästi A-uunia parempi hyötysuhde. Todennäköisempää kuitenkin on, että polttokaasun virtausmittauksessa oleva karkea virhe. Tätä hypoteesia tukisi myös kokonaismalli, sillä malli saataisiin täsmäämään mittauksiin B-uunin 3,5 % polttoainesyötön lisäyksellä. On myös mahdollista, että mittausvirhe on A-uunilla, jolloin myös kokonaismallissa olisi epätarkkuutta lämmönsiirtymisen mallintamisessa.



Kuva 33. Simuloinnin ja mittauksen välinen lämpötilaero eri tasepäivinä B-uunilla. Virtausmäärä kertoo uunin kokonaissyötön kullakin tasepäivänä.

Tuubien likaantumista tasepäivien välillä seurattiin vertaamalla mitattuja pintalämpötiloja simuloituihin lämpötiloihin. A-uunin osalta merkittävää likaantumista ei havaittu. B-uunilla sitä vastoin pintalämpömittausten ja simulointien välillä oli eroa, kuten kuvasta 34 voidaan havaita, joten likaantumista voidaan päätellä tapahtuneen. Toisaalta, jos aiemmin havaittu polttoainevajaus on todellinen, se vaikuttaa myös pintalämpötiloihin pienentäen mallinnettua likaantumista.



Kuva 34. B-uunin tuubien mallinnettu läpikäyntikohtainen (A-H) likaantuminen.

Valitettavasti neljästä tasepäivästä, jotka työn aikana ehdittiin keräämään, lähes kaikissa oli puutteita mittauksissa. Osassa tasepäivistä yksi tai useampi uunin haarakohtaisista syöttöpaineen mittauksista oli jäätynyt, jonka vuoksi näiden kohdalla piti arvioida syöttöputkiston alkupään painehäviö aiempien mittausten perusteella, mikä lisää mallinnuksen epätarkkuutta.

10 Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset

Prosessiuunien liekkien ulkonäöstä voidaan päätellä toimiiko uuni tehokkaasti ja turvallisesti. Liekeistä on esimerkiksi mahdollista havaita syötetäänkö uunille oikea määrä polttoilmaa. Ylimääräinen polttoilman syöttö lisää polttokaasun kulutusta kasvattaen tarpeettomasti kustannuksia. Turvallisuuden kannalta esimerkiksi uunin tuubeihin koskettavat liekit voivat pahimmillaan aiheuttaa pysyviä vaurioita uunille ja lyhentää uunin seisokkiväliä. Näin ollen prosessiuunin liekkien säännöllinen tarkastelu on ehdottoman tärkeää turvallisen ja energiatehokkaan operoinnin kannalta.

Työssä käytetyllä simulointiohjelmalla on rajoitteita epätasaisesti jakautuneen syöttövirran mallintamisessa. Rajoitteiden kiertämiseksi valittiin mallinnustapa, jossa kokonaismalli on koottu kolmesta osamallista: molemmat uunin säteilyosan lohkot ja konvektio-osa erikseen. Verrattaessa jaettua kokonaismallia alkuperäiseen tasaisesti jakautuneen virtauksen malliin havaittiin, että jaetun mallin tulokset eivät poikenneet merkittävästi alkuperäisestä mallista. Kuitenkin uudella mallilla pystyttiin vaikuttamaan yksittäisten läpikäyntien ominaisuuksiin. Näin ollen simulointiohjelman rajoitteet kierrettiin onnistuneesti ja läpikäynnit saatiin mallinnettua yksittäin.

Porvoon jalostamon raakaöljyntislausyksikön uuneja BA-10101/II A ja B käytettiin mallinnuksessa esimerkkiuuneina. Prosessiuunimallin tulopuolen putkiston painehäviö lähimmältä lämpötilamittaukselta uunille mallinnettiin kahdessa osassa. Painehäviö lämpötilamittauksen kohdalta olevalta painemittaukselta syöttöhaarakohtaiselle painemittaukselle mallinnettiin suoraan näiden painemittausten mittauseron. Tuloputkisto syöttöhaaran painemittaukselta uunille mallinnettiin pystyputkella ja ekvivalentilla venttiilin kertavastuksella jolla huomioitiin mutkista ja toimilaitteista aiheutuva painehäviö. Kertavastus määritettiin toisella mallilla, johon tuloputkisto oli määritelty todellisen putkiston tarkkuudella. Tuloputkistossa virtaus on vain vähän höyrystynyt, jolloin kaksifaasivirtauksen

vaikutus painehäviöön on pieni. Täten tuloputkiston painehäviön mallinnustapaa voidaan pitää suhteellisen tarkkana.

Prosessiunimallin poistopuolen siirtolinjan painehäviö lähimmälle painemittaukselle mallinnettiin vastaavalla tavalla kuin tuloputkiston painehäviö. Verrokiksi rakennettiin malli siirtolinjastosta, jossa vastaava, mutta tasaisesti jakautunut virtaus yhdistyy ennen painemittausta. Ongelmana on virtauksen suuri höyrystymisaste, jolloin putkiston korkeusmuutoksen ja virtausvastuksen erotteleminen aiheuttaa merkittävää virhettä painehäviön mallinnuksiin. Näin ollen siirtolinjaston tarkemmasta mallintamisesta olisi mahdollista saada lisähyötyä.

Mallin käyttäytymistä seurattiin virittämällä energiatase ja painehäviö yhdelle tasepäivälle ja käyttämällä saatuja parametreja muina tasepäivinä. Energiatase viritettiin lämpövuonkertoimien avulla ja painehäviö putkikarheuden avulla. Tulosten perusteella viritetty malli vastaa melko tarkasti mitattuja arvoja. Muiden tasepäivien tulosten perusteella havaittiin, että prosessiaineen syöttömäärän muuttuessa merkittävästi kokonaismallin tarkkuuden havaittiin heikentyvän olennaisesti. Samoin tapahtui uunin ulostulopaineen muuttuessa. Näin olen mallin tarkkuuden säilyttämiseksi täytyy energiatase ja painehäviö virittää uudestaan kokonaissyötön tai prosessiunin ulostulopaineen muuttuessa merkittävästi.

Tasepäivien välillä tapahtunutta tuubien likaantumista seurattiin pintalämpötilojen avulla. Tuubin likaantumisvastusta muuttamalla tuubien pintalämpötilat saatiin vastaamaan mitattuja pintalämpötiloja. Tuubin likaantuessa mallin tulokset ja mittaustiedot alkavat vähitellen poiketa toisistaan pintalämpötilojen osalta, jolloin voidaan olettaa likaantumista tapahtuneen. Työn aikana tehdyssä seurannassa B-uunilla havaittiin likaantumista edellisen olettan perusteella. Tasepäiviä olisi kuitenkin tarvittu useampia havaintojen varmentamiseksi, sillä B-uunin mittauksissa oli puutteita useissa seuratuista tasepäivistä.

Useampina tasepäivinä havaittiin puutteita kerätyissä mittaustiedoissa. Osa paine- ja virtausmittauksista oli vioittunut ja näytti selvästi vääriä lukemia. Tasepäivän virityksen onnistumisen kannalta on tärkeää, että selvät mittausrvirheet havaitaan ja

kyseiset tasepäivät jätetään pois seurannasta. Täten tehokas mallin käyttäminen prosessiuunin seurantaan vaatii käyttäjältään mittaustietojen tarkastamisen karkeiden virheiden löytämiseksi. Myös kaikki havaitut vialliset mittaukset on syytä korjauttaa mahdollisimman nopeasti, viimeistään ennen seuraavaa tasepäivää.

Prosessiuuniin liittyy useita laitteita, joiden toiminnan seuraamisesta olisi hyötyä huoltotarpeen ennakoinnissa. Esimerkiksi polttoilmapuhaltimien kierrosnopeutta ja läpivirtaavan ilman määrää seuraamalla sekä vertaamalla näitä tietoja kyseisten puhaltimien puhallinkäyriin pystyttäisiin poikkeamat puhaltimen toiminnassa havaitsemaan ja niihin voitaisiin myös puuttua ajoissa.

Mallin avulla voidaan myös seurata prosessiuunin ilman esilämmittimen lämmönsiirtokertoimen muutosta ja tämän avulla seurata esilämmittimen mahdollista likaantumista. Päätelmien tekeminen esilämmittimen kunnosta vaatii pidempiaikaista seuraamista, sillä esilämmitin oli osittain ohitettuna useampana nyt kerätyistä tasepäivistä. Esilämmittimen ohitus pienentää lämmitettävän ilman virtausta esilämmittimeen vaikuttaen lämmönsiirtokertoimeen.

Työssä laadittua mallinnuskonseptia on mahdollista soveltaa myös muihin jalostamon prosessiuuneihin. Tasepäivän tiedon keräämisessä ja analysoinnissa on yhä useampi mekaaninen paljon aikaa vievä vaihe, joita olisi mahdollista nopeuttaa automatisoimalla vaiheet. Tämän hetkisessä muodossaan tasepäivien tiedon keräämisen ja analysoimisen siirtäminen käyttöinsinöörin vastuulle ei ole vielä suositeltavaa.

Työssä mallinnetut prosessiuunit olivat jalostamon suurimmat ja mahdollisesti myös monimutkaisimmat. Mallinnettaessa pienempiä uuneja, joissa läpikäyntien määrä on työssä mallinnettuja prosessiuuneja pienempi, simulointiohjelmiston tuubiryhmärajoitteet eivät rajoita, eikä kokonaismallia siten tarvitse jakaa useampaan osamalliin. Tällöin mallinnuksesta poistuu yksi epätarkkuutta lisäävä tekijä.

Lähdeluettelo

Ahamad, S., Vallavanatt, R., 2013, Successfully design fired heaters using ultra-low-NOx burners,
<http://www.hydrocarbonprocessing.com/Article/3213537/Successfully-design-fired-heaters-using-ultra-low-NOx-burners.html> , 26.10.2015.

Baukal, C.E., Heat transfer in industrial combustion, CRC Press, Boca Raton (FL) 2000.

Baukal, C.E., *John Zink Hamworthy Combustion Handbook* Volume 1, CRC Press, Boca Raton (FL): 2013.

Baukal, C.E., *John Zink Hamworthy Combustion Handbook* Volume 2, CRC Press, Boca Raton (FL) 2014.

Baukal, C.E., *John Zink Hamworthy Combustion Handbook* Volume 3, CRC Press Boca Raton (FL) 2014.

Bell, H., Lowy, L., *Petroleum Processing Handbook*, McGraw-Hill, New York 1967, ss. 245-290.

Cheng, T. S., Premixed Methane - Air Flame Spectra Measurements Using UV Raman Scattering, *Combust. Sci. and Tech.* **135** (1998) 65-84.

Darling, D., 1999, Encyclopedia of Science: Flame,
<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/F/flame.html> , 30.10.2015

ESA Pyronics, 2000, Nozzel-Mixing Burners Chapter 6,
<http://www.abmcombustion.com.au/images/downloads/m0006e.pdf> , 26.10.2015.

Griffiths, J.F., Barnard, J.A., 1995. Flame and Combustion, CRC Press, 1995, ss. 20-40.

Holloway, M. D., Nwaoha, C. ja Onyewuenyi, O. A., Process plant equipment operation, reliability, and control, John Wiley & Sons, Somerset 2012, ss. 319-321.

ISO:13705:2012, Fired Heaters for General Refinery, 2012.

Jones, G. W., Lewis, B. ja Seaman, H., The Flame Temperatures of Mixtures of Methane-Oxygen, Methane-Hydrogen and Methane-Acetylene with Air, *J. Am. Chem. Soc.* **53** (1931) 3992-4001.

Klaus, P., Warnatz, J., A contribution towards a complete mechanism for the formation of NO in flames, *French and German Section of the Combustion Institute*, Mulhouse 1995.

Koiwanit, J., 2014. A life cycle assessment study of a hypothetical Canadian oxy-fuel combustion carbondioxide capture process, *International Journal of Greenhouse Gas Control* **28** (2014) 257-274.

Kurdyumov, V., Fernández, E. ja Liñán, A., Flame flashback and propagation of premixed flames near a wall. *Proceedings of the Combustion Institute* **28** (2000) 1883-1889.

Lieberman, N. P., 2009. Troubleshooting process operations, *PennWell*, Tulsa 2009, ss. 333-356.

Lowe, C., Technology Assessment of Oxy-Firing of Process Heater Burners, *Energy Procedia* **37** (2013) 7793-7801.

Mansurov, Z. A., Soot Formation in Combustion Processes, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **41** (2005) 727-744.

McManus, K., Poinso, T. ja Candel, S., 1993. A review of active control of combustion instabilities, *Progress in Energy and Combustion Science* **19** (1993) 1-29.

Mullinger, P., Jenkins, B., Industrial and process furnaces : principles, design and operation, Butterworth-Heinemann, Amsterdam 2008.

Muñiz, L., Mungal, M., Instantaneous flame-stabilization velocities in lifted-jet diffusion flames. *Combustion and Flame* **111** (1997) 16-31.

Neste Oyj, Pressure part convection modules, Porvoon tuotantolaitokset, Porvoo 2015.

Reed, R., Furnace Operations, Gulf Publishing, Houston (TX) 1981.

Schefer, R. W., Kulatilaka, W. D., Patterson, B. D. ja Settersten, T. B., Visible emission of hydrogen flames. *Combustion and Flame* **156** (2009) 1234-1241.

Spakovszky, Z. S., 2007, Unified: Thermodynamics and Propulsion, <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node111.html>, 30.10.2015.

Sze, L., Cheung, C. ja Leung, C., Appearance, temperature, and NOx emission of two inverse diffusion flames with different port design, *Combustion and Flame* **144** (2006) 237-248.

Turns, S., *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill, New York 2000, s. 565.

W.C. Gardiner, J., *Gas-Phase Combustion Chemistry*, Springer-Verlag, New York 2000, s. 538.

Warnatz, J., Maas, U. & Dibble, R. W., *Combustion : physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant*, Springer, Berlin 1999, s. 266.

Yuen, W. W., Definition and Evaluation of Mean Beam Lengths for Applications in Multidimensional Radiative Heat Transfer: A Mathematically Self-Consistent Approach, *Journal of Heat Transfer* **130** (2008).

Zeldovich, Y. B., The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochim* **21** (1946) 577.